

WORKSHOPS DE IDENTIFICAÇÃO DE MODOS DE FALHA:
DOCUMENTOS DE APOIO À APLICAÇÃO DO GUIA

Catálogo para obras de proteção contra inundações fluviais, pluviais e costeiras



Expressamos nossa gratidão ao Japan Special Fund (JSF) por viabilizar esta publicação por meio da cooperação técnica RG-T3528: Implementação da metodologia para fortalecer a resiliência ao risco de desastres e à mudança climática nos projetos do BID.

Coautoria: A produção e disseminação deste Guia Metodológico e seus Catálogos foram coordenadas por Raimon Porta e Ginés Suárez, com as valiosas contribuições de Julia Ciancio, María Alejandra Escovar e Adriana Zambrano. O desenvolvimento do conteúdo do Guia e a catalogação dos Modos de Falha foram realizados por Ignacio Escuder, Adrián Morales, Sandra Navarro e Helena Yarritu, equipe técnica da empresa consultora iPresas.

Agradecimentos: O processo de revisão técnica contou com a inestimável colaboração de Melissa Barandiarán, Karen Piñeros e Carolina Rogelis. O desenvolvimento do curso online de capacitação associado a este Guia foi realizado pela empresa TAEC com o apoio da equipe do INDES e o feedback de Álvaro Adam, Leandro Kazimierski e Luis Mora. A produção de conteúdo, sua publicação e difusão foram possíveis graças a Edoardo Brovero, Lara Chinarro, Wilhelm Dalaison, Maricarmen Esquivel, Patricia Henríquez, Sergio Lacambra, Roberto Leal, Katherine López, David Maier, Lidia Marcelino, Pamela Ogando, Harold Rodríguez e Serge Troch.

Design e diagramação: Alejandro Scaff.

Citação sugerida: Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Workshops de Identificação de Modos de Falha. Documentos de apoio à aplicação do Guia. Catálogo para obras de proteção contra inundações fluviais, pluviais e costeiras.

Palavras-chave: modos de falha, infraestrutura, risco, desastre, resiliência, inundações, obras hidráulicas.

Copyright©2025 Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Esta obra está sujeita a uma licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0 CÓDIGO LEGAL) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.pt>). Devem ser cumpridos os termos e condições indicados no link e deve ser feito o devido reconhecimento ao BID.

Qualquer disputa que surja sob esta licença e que não possa ser resolvida de maneira amigável será resolvida de acordo com o seguinte procedimento. Conforme notificação de mediação comunicada por meios adequados por você ou pelo outorgante da licença à outra parte, a disputa será submetida à mediação não vinculativa realizada de acordo com as Regras de Mediação da OMPI. Qualquer disputa que não puder ser resolvida de forma amigável será submetida à arbitragem conforme as regras da Comissão das Nações Unidas para o Direito Comercial Internacional (CNUDCI). O uso do nome do BID para qualquer finalidade que não seja o reconhecimento correspondente, bem como o uso do logotipo do BID, não está autorizado por esta licença e requer um acordo de licença adicional. Observe que o link URL inclui termos e condições que são parte integrante desta licença. As opiniões expressas nesta obra são dos autores e não refletem necessariamente os pontos de vista do Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva ou dos países que representa

Observe que o link URL inclui termos e condições que fazem parte integrante desta licença.

As opiniões expressas nesta obra são exclusivamente dos autores e não refletem necessariamente o ponto de vista do BID, de sua Diretoria Executiva ou dos países que representa.



Documentos de apoio à aplicação do guia: Catálogo para obras de proteção contra inundações fluviais, pluviais e costeiras

Siglas e abreviações	4
1. Introdução	5
2. Características específicas das obras de proteção	6
2.1. Participantes	6
2.2. Revisão de informações	7
2.3. Visita técnica	8
3. Modos de Falha	9
3.1. Modos de Falha por inundação pluvial	11
3.2. Modos de Falha por inundação fluvial	12
3.3. Modos de Falha por inundação costeira	34
3.4. Modos de Falha por sistema de gestão de risco	39
4. Relação de estudos científico-técnicos	45
5. Recomendações e boas práticas	47
Referências	53

Siglas e abreviações

ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i> (Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens)
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Civis)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CDA	<i>Canadian Dam Association</i> (Associação Canadense de Barragens)
CCS	Divisão de Soluções de Mudança Climática do BID
CPR	Comunidade de Prática de Resiliência do BID
CWC	<i>Central Water Commission</i> (Comissão Central de Águas – Índia)
DRM	Unidade de Gestão de Risco de Desastres do BID
ESG	Divisão de Soluções Ambientais e Sociais do BID
ESR	Unidade de Gestão de Riscos Ambientais e Sociais do BID
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (Comissão Federal de Regulação de Energia – EUA)
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos)
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i> (Comissão Internacional de Grandes Barragens)
INE	Setor de Infraestrutura e Energia do BID
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
MARDMC	Metodologia de Avaliação de Riscos de Desastres e Mudança Climática do BID (em inglês, DCCRAM)
MF	Modo de Falha
MPAS	Marco de Política Ambiental e Social do BID
OP-704	Política de Gestão de Risco de Desastres do BID
PAE	Plano de Ação de Emergência
PGRD	Plano de Gerenciamento de Riscos de Desastres
SPANCOLD	Comitê Nacional Espanhol de Grandes Barragens WIMF Workshop de Identificação de Modos de Falha
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i> (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i> (Departamento de Recuperação de Recursos Hídricos dos Estados Unidos)

1. Introdução

O objetivo deste documento, juntamente com o “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, é desenvolver a metodologia dos Workshops de Identificação de Modos de Falha (WIMF) e sua aplicação específica a certas infraestruturas.

Os workshops são a parte principal da análise qualitativa de riscos de desastres e de mudança climática em infraestruturas. Por isso, e com o objetivo de garantir a correta aplicação do guia, foram desenvolvidos diversos **documentos de referência** que fornecem, de maneira clara e exaustiva, para cada tipo de infraestrutura, as técnicas, os processos e as ferramentas necessárias para o adequado desenvolvimento dos Workshops de Identificação de Modos de Falha e a posterior tomada de decisões. Vale destacar que falha não significa necessariamente a ruptura da infraestrutura, mas também a perda do serviço que ela presta.

Especificamente, este Catálogo visa apoiar e complementar a aplicação do “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha” em **obras de proteção contra inundações fluviais, pluviais e costeiras**.

O documento está organizado em **quatro secções**. A primeira detalha as **características** particulares das obras de proteção contra inundações que devem ser consideradas ao realizar as sessões de Modos de Falha. Isso inclui desde os participantes que devem estar presentes, passando pelos elementos-chave da revisão de informações e da visita técnica.

A segunda secção reúne exemplos dos **Modos de Falha mais representativos**, classificados de acordo com seu evento desencadeante. Para cada Modo de Falha, foi elaborada uma ficha que inclui a sua descrição, um esquema e os fatores que influenciam o risco. Esses fatores podem aumentar ou diminuir o risco, dependendo da situação ou das informações disponíveis em cada uma das infraestruturas a serem analisadas. Como será discutido adiante, esses exemplos servem como referência para o leitor, que deverá definir os Modos de Falha e os fatores associados à sua obra de proteção contra inundações ao longo dos workshops e com a participação de todos os integrantes do grupo de trabalho.

Por fim, a terceira e a quarta secções incluem uma relação de **estudos técnico-científicos** e de **recomendações e melhores práticas**, agrupadas segundo a tipologia dos Modos de Falha utilizada na segunda secção. Essas duas **últimas** partes visam enriquecer as práticas de intervenção dos Workshops de Identificação de Modos de Falha, destacando as questões que podem apresentar menor definição nos projetos ou maior relevância no desenho e na operação da infraestrutura.

2. Características particulares para obras de proteção

Esta seção apresenta as características específicas associadas ao Workshop de Identificação de Modos de Falha para obras de proteção contra inundações. Especificamente, os aspectos que diferem da metodologia geral apresentada no guia estão relacionados ao número mínimo de participantes que devem comparecer e à viabilidade ou não de realizar a visita técnica de forma online.

2.1 Participantes

As sessões do Workshop de Identificação de Modos de Falha são compostas por um facilitador e um grupo de participantes. No caso de obras de proteção contra inundações fluviais, pluviais e costeiras, é recomendável que participem, no mínimo, os seguintes especialistas:

- **Projeto das obras de proteção.** É recomendável a presença dos técnicos responsáveis pelo projeto e pela construção, quando for o caso, para que compartilhem sua experiência, as dificuldades encontradas e eventuais modificações do projeto original, bem como o processo construtivo utilizado. Esses participantes enriquecem os Workshops de Modos de Falha, sendo essenciais, especialmente em projetos em fase de concepção.
- **Hidrologia e hidráulica.** Recomenda-se a participação do(s) especialista(s) que atuaram no estudo hidrológico e hidráulico durante o projeto das obras de proteção ou, na ausência destes, de outro especialista na área. A hidrologia e a hidráulica são fundamentais no dimensionamento das obras de proteção contra inundações. A participação desse especialista é importante independentemente da fase em que se encontra a obra.
- **Medidas de adaptação à mudança climática.** Como os projetos de obras de proteção incluem estudo hidrológico/hidráulico, é relevante considerar a influência da mudança climática na intensidade das precipitações e no nível das cheias para determinado período de retorno. Por isso, é recomendável a presença de um especialista em riscos relacionados à mudança climática.
- **Geologia, geotecnia e sismicidade da área.** Recomenda-se a participação de um técnico especializado em geologia e geotecnia, que possa avaliar os materiais utilizados e a fundação das obras. Caso a obra esteja localizada em área sísmica, o especialista deve ter conhecimento para verificar se os riscos foram analisados e se a obra foi projetada adequadamente. Essa participação é recomendada em qualquer fase do projeto.
- **Manutenção.** Para obras em fase de operação, recomenda-se a presença dos técnicos responsáveis pelas inspeções e manutenção da infraestrutura, pois sua experiência pode ser fundamental para identificar Modos de Falha decorrentes de mau funcionamento. Em novos projetos, é recomendável convidar os técnicos que irão operar e manter a infraestrutura no futuro.
- **Elementos hidromecânicos.** Caso as obras possuam componentes hidromecânicos (como comportas, tomadas de água etc.), é importante que um especialista nesses equipamentos participe dos workshops, especialmente se esses elementos forem críticos para a segurança.

- **Gestão de emergências.** A gestão de emergências é essencial em obras de proteção contra inundações. Recomenda-se convidar os responsáveis por essa área, pois sua visão contribui para compreender as consequências das possíveis falhas e o funcionamento do sistema de resposta.
- **Representantes locais e comunidades minoritárias.** A participação de representantes locais é relevante, pois eles podem fornecer conhecimento sobre a efetividade dos sistemas de alerta, os impactos de falhas ou rupturas e a exposição às ameaças naturais locais.
- **Governança de risco.** É recomendável a participação de técnicos que atuem em comitês de gestão de risco ou que sejam responsáveis pela implementação de planos de gestão de risco.
- **Especialistas externos ao projeto.** Eles agregam conhecimento técnico e uma perspectiva imparcial, podendo destacar aspectos que os envolvidos diretamente no projeto podem não perceber.

Embora esses perfis sejam recomendados para a realização de Workshops de Modos de Falha em obras de proteção contra inundações, é importante avaliar cada caso para definir quais atores são realmente necessários e se há necessidade de incluir outros profissionais.

2.2 Revisão de informações

Conforme explicado no “Guia Metodológico para a realização de Workshops de Identificação de Modos de Falha”, a revisão e análise das informações existentes constituem a primeira etapa para a identificação dos Modos de Falha e devem abranger todos os aspectos-chave relacionados à gestão da segurança, partindo das fases de projeto e construção da infraestrutura, passando pela avaliação do sistema, do funcionamento e do estado atual da obra.

A revisão das informações deve destacar os pontos-chave dos documentos disponíveis. Assim, do ponto de vista conceitual, os elementos fundamentais a serem considerados na revisão de informações para a análise de obras de proteção contra inundações são apresentados na Figura 1.

Alguns pontos destacados neste esquema podem não ser necessários, dependendo da fase do projeto em que se encontra a infraestrutura. Por exemplo, o estado atual da obra não será considerado no caso de uma infraestrutura ainda em fase de projeto.

Figura 1. Elementos-chave da revisão de informações



2.3. Visita técnica

A visita técnica é uma das etapas principais dos Workshops, pois permite obter uma visão integral do estado atual da infraestrutura e detectar possíveis danos que possam levar à sua falha.

Essa atividade é recomendável ser realizada presencialmente, já que possibilita uma inspeção mais detalhada por parte dos especialistas. No entanto, para algumas infraestruturas, pode-se considerar sua realização online caso a opção presencial não seja viável logisticamente.

A seguir, apresenta-se a viabilidade de inspecionar as obras de proteção contra inundações de forma online.

Obras de proteção contra inundações pluviais e fluviais

A visita técnica às obras de proteção contra inundações pluviais e fluviais, construídas ou não, deve ser realizada de forma presencial, pois é extremamente útil e necessária. Ela permite que a equipe compreenda a dinâmica da população local, conheça a região, saiba onde estão localizadas as comunidades e as obras de proteção, quais são suas características básicas (dimensões e materiais), além de obter conhecimento direto sobre inundações históricas, medidas adotadas, etc. Essas informações dificilmente poderiam ser adquiridas online por meio de vídeos realizados com drones.

Obras de proteção costeira

Para obras de proteção costeira, é viável realizar a visita técnica de forma online, tanto na fase de projeto quanto na fase de operação, já que por meio de imagens e sobrevoos com drones é relativamente simples observar o estado da infraestrutura. Isso não exclui, porém, a possibilidade de uma visita presencial. Além disso, recomenda-se complementar a inspeção com vídeos submarinos que permitam observar a disposição dos elementos na base do dique, pois estes podem sofrer danos ao longo do tempo e levar à falha da obra.

3. Modos de Falha

A seguir, são listados os Modos de Falha mais característicos para obras de proteção contra inundações, classificados segundo sua tipologia: Modo de Falha por inundação pluvial, fluvial, costeira e por falhas no sistema de gestão de riscos.

3.1. Modos de Falha por Inundação Pluvial:	11
• Falta de capacidade dos cursos d'água	11
• Inundação por insuficiência do sistema de drenagem urbana	12
• Inundação por represamento da drenagem devido ao nível elevado do rio	13
• Impossibilidade de drenagem devido à existência de diques	14
• Elevação do nível do rio impede a drenagem pluvial	15
• Arraste de material em bacias hidrográficas superiores	16
3.2. Modos Falha por Inundação Fluvial:	17
• Inundação fluvial	17
• Danos antrópicos em diques	18
• Transbordamento de diques	19
• Erosão na base do dique	20
• Erosão por jusante do dique	21
• Erosão nos encontros de obras de arte	22
• Aumento de erosão em uma margem devido a proteção na margem oposta	23
• Erosão na base de gabiões	24
• Erosão na transição dos gabiões	25
• Deslizamento/tombamento de gabiões	26
• Dano e tombamento de muros de gabiões	27
• Crescimento excessivo de vegetação e perda da capacidade de escoamento do canal/córrego	28
• Acúmulo de sedimentos no canal	29
• Bloqueio de comportas em córregos	30
• Impossibilidade de fechamento das comportas	31
• Inundação por descontinuidade em diques	32
• Tubificação, ruptura de diques e inundação	33
3.3. Modos de Falha por Inundação Costeira:	34
• Inundação costeira	34
• Falha por erosão de praias e dunas	35
• Aumento de assentamentos informais em áreas protegidas	36
• Falha de diques devido à ação das ondas	37
• Falha de diques por transbordamento	38

3.4. Modos de Falha Relacionados ao Sistema de Gestão de Riscos 39

- Ineficácia do sistema de alerta 39
- Aumento de áreas urbanas desenvolvidas 40
- Conflitos sociais 41
- Ocupação humana em áreas de sacrifício 42
- Danos ambientais por despejo de poluentes 43
- Má gestão de reservatórios e descargas a jusante 44

A seguir, serão desenvolvidos os Modos de Falha mais representativos para infraestruturas de proteção contra inundações, detalhando os fatores que influenciam o risco de cada Modo de Falha. Tanto os Modos de Falha como os fatores são apresentados de maneira geral, ou seja, o leitor pode utilizá-los como referência, mas deverá desenvolver seus próprios Modos de Falha ao longo do Workshop e com a participação de todos os integrantes do grupo de trabalho.

Além disso, os fatores são redigidos de forma neutra para que o leitor analise, conforme o caso específico, se aumentam ou reduzem o risco de determinado Modo de Falha.

Há uma série de fatores que, de alguma forma, influenciam o risco em todos os Modos de Falha. Para evitar repetições, esses fatores são apresentados no seguinte listado e não serão repetidos nas tabelas posteriores.

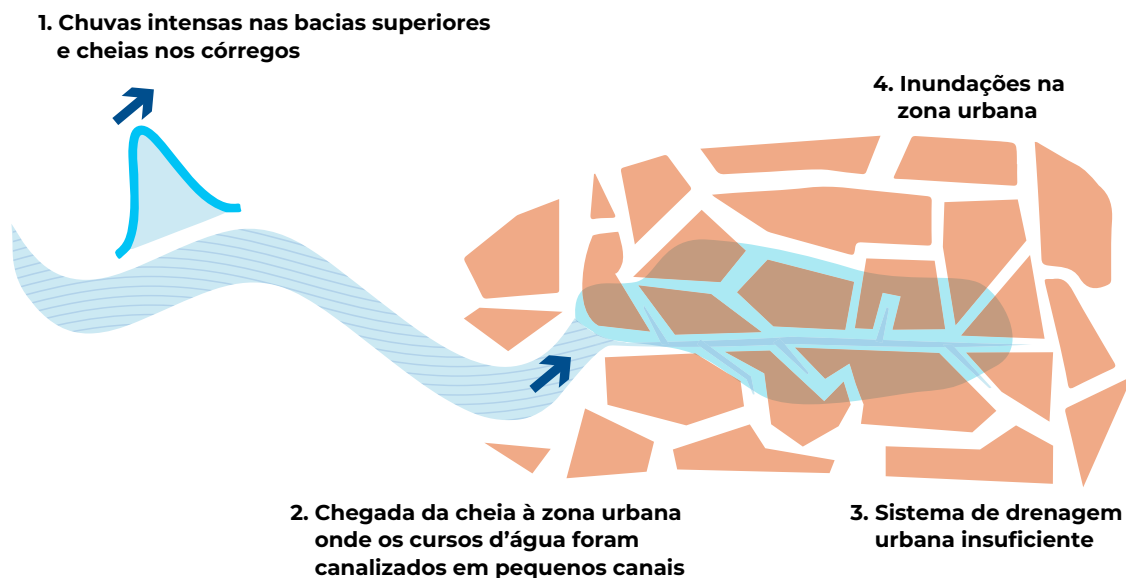
Fatores a considerar em todos os Modos de Falha de obras de proteção contra inundações:

- Disponibilidade de recursos para estudos prévios ou de pré-investimento dos projetos de proteção contra inundações.
- Controle de qualidade e supervisão no projeto e na construção das obras de proteção.
- Existência de crescimento urbano descontrolado e/ou assentamentos fora dos limites protegidos.
- Existência de planos e programas para coordenação de ações entre diferentes municípios e entidades.
- Definição de responsabilidades pela manutenção dos cursos d'água entre os municípios.
- Existência de marco legal e institucional de regulação.
- Existência de sistemas de alerta antecipados contra inundações.
- Existência de Planos de Ação de Emergência (PAE).
- Campanhas de informação e conscientização da comunidade sobre a importância e os riscos relacionados às inundações.
- Antropização da bacia hidrográfica que possa aumentar a impermeabilização do solo.

3.1. Modos de Falha por Inundação Pluvial

FALTA DE CAPACIDADE DOS CÓRREGOS

Em cenário hidrológico, ocorre uma precipitação significativa nas bacias hidrográficas superiores dos córregos, provocando uma cheia de grande magnitude. Ao alcançar a área urbana e devido à redução da seção dos canais causada pelo desenvolvimento urbano e pela drenagem insuficiente, essas cheias provocam inundações nas habitações circundantes.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do curso d'água.
- Antropização da bacia hidrográfica.
- Existência de sistema de esgotamento sanitário e pluvial separado.
- Ações de manutenção e monitoramento do curso d'água.
- Presença de desmatamento na bacia, que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos mais elevados de cheia e tempos de concentração mais curtos.
- Presença de reduções de seção nos canais dos afluentes e no curso principal devido ao desenvolvimento urbano, chegando inclusive ao desaparecimento do leito.

INUNDAÇÃO POR FALTA DE CAPACIDADE DA DRENAGEM URBANA

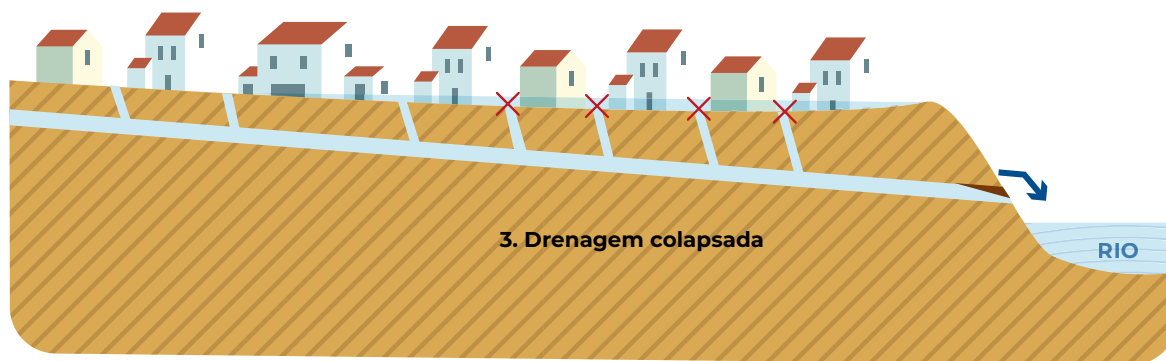
Em cenário hidrológico, ocorre uma precipitação significativa. O sistema de drenagem existente é insuficiente para escoar as enxurradas geradas, provocando o colapso do sistema e a inundação de ruas e residências.

1. Chuvas de alta intensidade em área urbana



2. Capacidade de drenagem insuficiente

4. Inundação de residências



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Antropização da bacia hidrográfica.
- Existência de sistema de esgotamento sanitário e pluvial separado.
- Atividades de manutenção e vigilância das obras de drenagem.

INUNDAÇÃO POR INCAPACIDADE DE DRENAGEM COM NÍVEL ELEVADO DO RIO

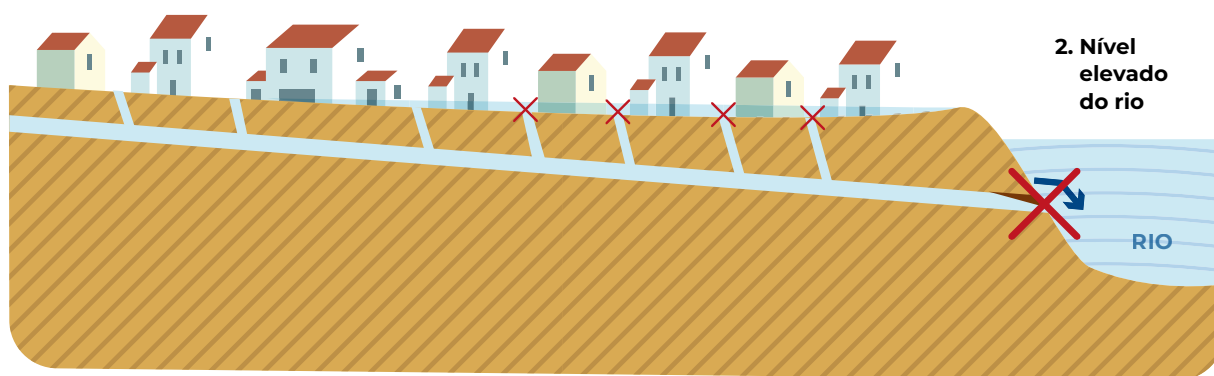
Em cenário hidrológico, ocorre uma precipitação significativa na zona urbana enquanto o nível do rio está elevado. A drenagem encontra-se colapsada, impossibilitando o escoamento e provocando a inundação de ruas e residências.

1. Chuvas de alta intensidade na zona urbana



4. Inundações de residências e

2. Nível elevado do rio



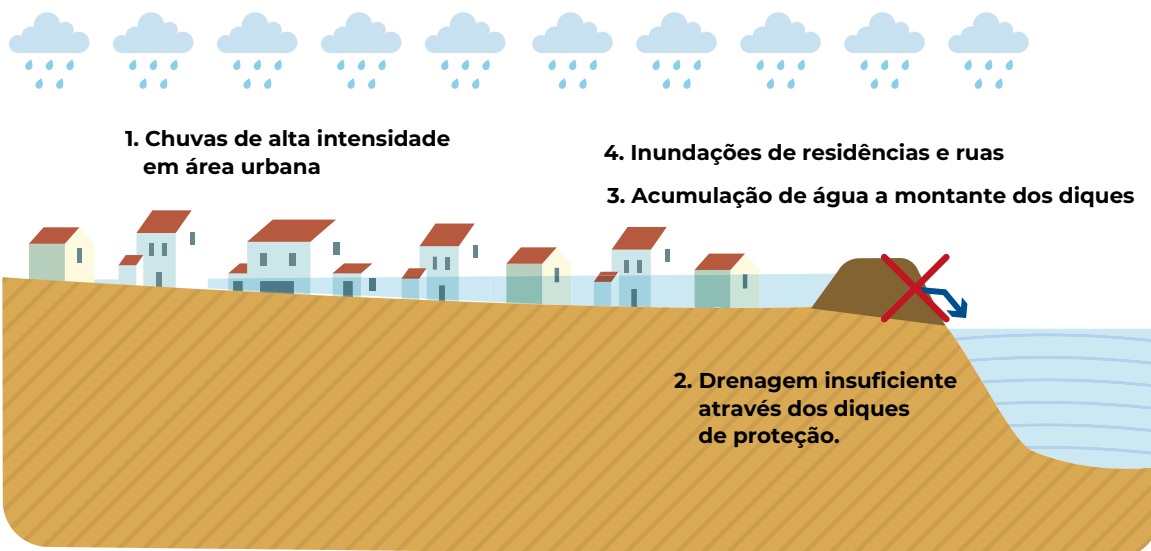
3. Drenagem colapsada

Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos das obras de drenagem.
- Antropização da bacia hidrográfica.
- Existência de sistema de esgotamento sanitário separativo.
- Atividades de manutenção e vigilância das obras de drenagem.

IMPOSSIBILIDADE DE DRENAGEM DEVIDO A DIQUE

Em cenário hidrológico, chuvas de certa intensidade geram escoamentos superficiais ao longo das vias de drenagem do terreno e da malha urbana em direção ao curso d'água. Se a drenagem através dos diques de proteção não tiver capacidade suficiente para escoar essas chuvas, poderá ocorrer uma acumulação temporária de água a montante desses diques, resultando em inundações das residências mais próximas ao curso d'água.



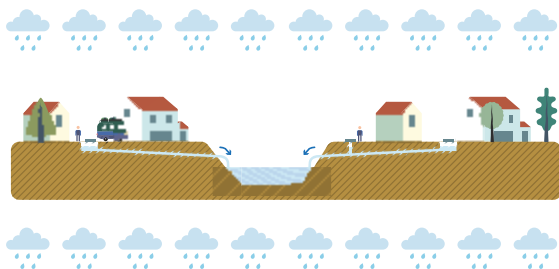
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Dimensionamento adequado das obras de drenagem.
- Existência de desmatamento na bacia que possa gerar erosão, arraste de sedimentos e o mau funcionamento da drenagem.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Obstrução dos canais de drenagem do município.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de drenagem entre diferentes municípios e entidades.
- Existência de sistema de esgoto separativo.
- Atividades de manutenção e vigilância dos canais de drenagem.
- Existência de comportas nas obras de proteção contra inundações.

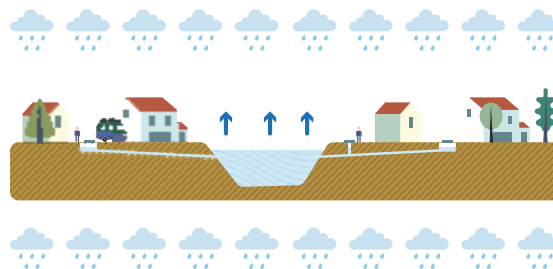
ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO RIO IMPEDE A DRENAGEM PLUVIAL

Em cenário hidrológico, ocorrem chuvas de alta intensidade ou prolongadas que geram cheias nos rios. Como consequência, o nível da água nos cursos d'água se eleva, provocando o colapso do sistema de drenagem pluvial existente nas localidades. Diante da impossibilidade de escoamento e da persistência das precipitações, ocorrem inundações em áreas urbanas.

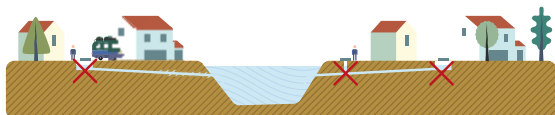
1. Chuvas intensas e cenário de cheias



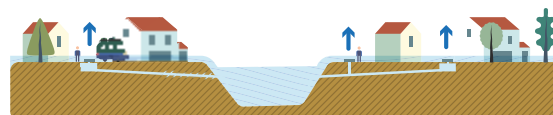
2. Elevação do nível do curso d'água



3. Impossibilidade de drenagem de águas pluviais



4. Inundação de áreas urbanas



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Dimensionamento adequado das obras de drenagem.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica, que pode gerar erosão, arraste de sedimentos e mau funcionamento da drenagem.
- Existência de obstruções no leito do rio.
- Existência de sedimentação contínua e progressiva no leito do rio.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de drenagem entre diferentes municípios e entidades.
- Existência de sistema de esgotamento sanitário separativo.
- Atividades de manutenção e vigilância da drenagem, do leito do rio e de suas margens.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito do rio.
- Conhecimento dos planos, campanhas e normas por parte da população.

ARRASTE DE MATERIAL EM BACIAS SUPERIORES

Após vários dias consecutivos de chuva, o solo nas bacias superiores apresenta alta umidade, ativando um deslizamento de grande magnitude em alguma dessas áreas. Esse deslizamento de terra gera um grande fluxo de material em direção à jusante, composto por uma combinação de água, terra e pedras, que arrasta consigo todos os diques de retenção de sedimentos localizados na bacia. Por fim, esse arraste de material alcança a zona urbana localizada na saída do cone de dejetos, com importantes consequências econômicas e sociais.



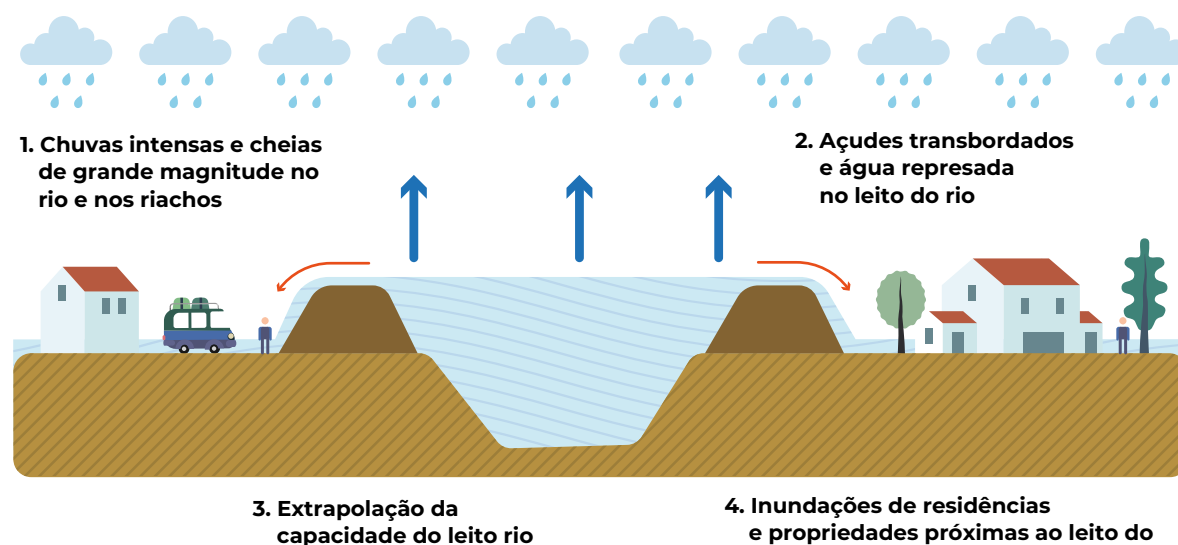
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação das bacias superiores das zonas urbanas.
- Existência de desmatamento na bacia, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, maiores picos de cheia e menores tempos de concentração.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Existência de diques nas bacias superiores que podem ser arrastados, aumentando o volume de material.
- Antropização da bacia.
- Existência de vegetação.
- Disponibilidade de recursos.
- Identificação de zonas críticas suscetíveis a deslizamentos.
- Existência de programas de manejo de bacias.
- Existência de conscientização social.

3.2. Modos de Falha por Inundação Fluvial

INUNDAÇÃO FLUVIAL

Em um cenário hidrológico, ocorre uma precipitação significativa na bacia do rio e/ou nas bacias dos riachos, que gera uma cheia de grande magnitude no rio. Essa cheia provoca o transbordamento dos diferentes açudes localizados no leito, os quais contribuem para o represamento da água. Por fim, com o aumento da vazão da cheia, ocorre a extrapolação da capacidade do leito, resultando em inundações nas residências e propriedades ao redor do rio.

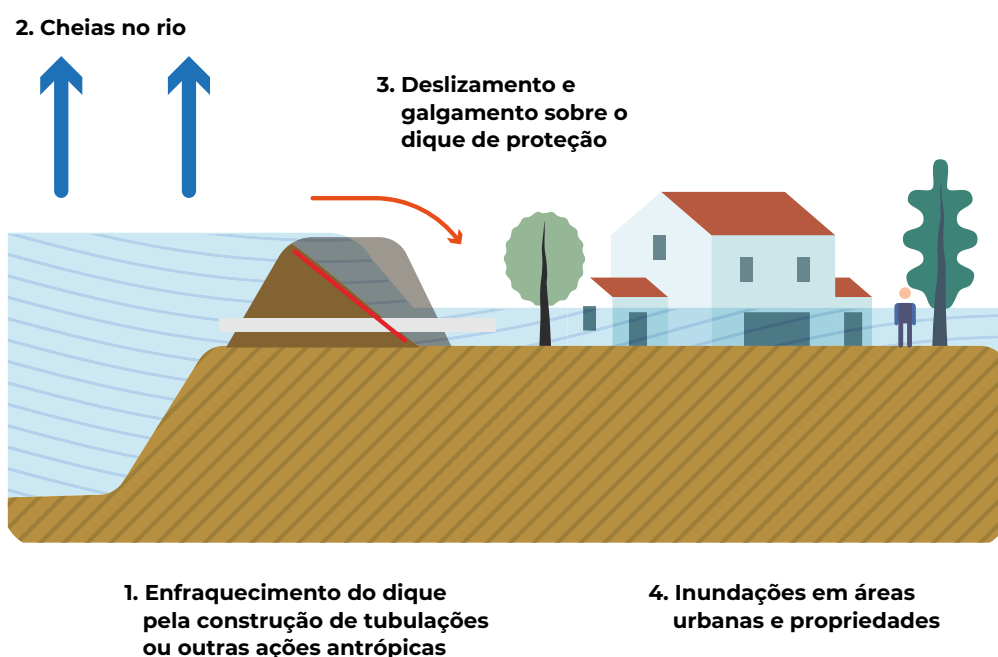


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia, que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Existência de vegetação.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de drenagem entre diferentes municípios e entidades.
- Atividades de manutenção e vigilância dos diques.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito do rio.
- Presença de reduções nas seções dos canais dos afluentes e no leito devido ao desenvolvimento urbano, chegando até à obstrução do canal.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão do pé.
- Projeto hidráulico adequado do dique.
- Projeto estrutural adequado do dique.

DANOS ANTRÓPICOS EM DIQUES

Durante a operação dos diques de proteção, ocorre um enfraquecimento da estrutura dos diques devido a ações antrópicas, como, por exemplo, a instalação de tubulações no corpo do dique para extrair água do rio para irrigação, a construção de tubulações de drenagem, a construção de pontes sobre o rio/córregos ou o mau planejamento de novos diques de proteção. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia no rio que exerce empuxo sobre os diques que, por se encontrarem estruturalmente frágeis, acabam falhando por deslizamento, provocando a inundação das áreas adjacentes com elevadas consequências econômicas e sociais.

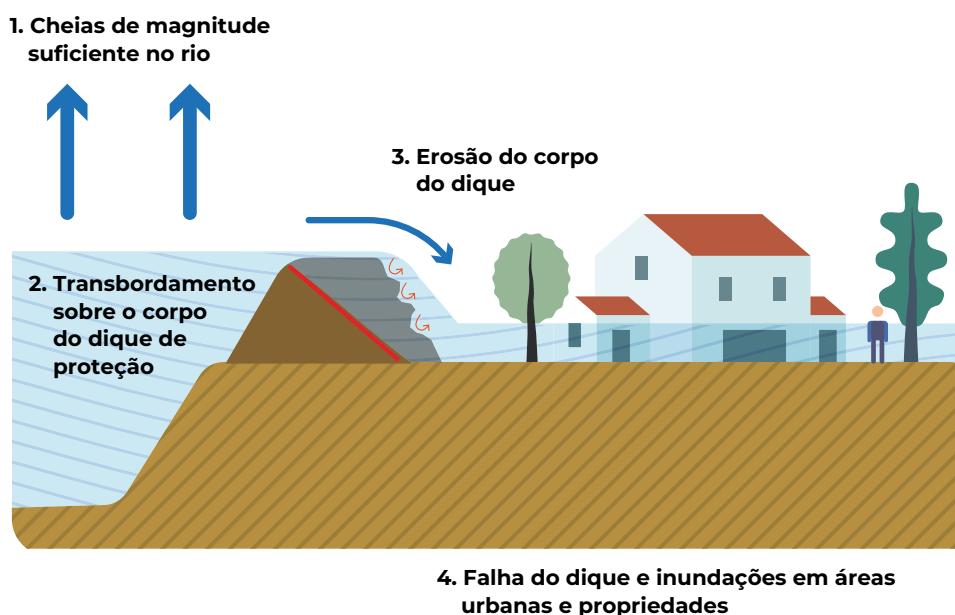


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de indústrias agrícolas e pecuárias próximas ao rio.
- Atividades de manutenção e monitoramento dos diques de proteção.
- Registro e controle dos pontos de captação de água para irrigação.
- Atividades de vigilância e controle da construção de tubulações e canais através dos diques.
- Dimensionamento adequado das obras de proteção.
- Existência de desmatamento na bacia que possa gerar erosão, arraste de sedimentos e o mau funcionamento dos diques.

TRANSBORDAMENTO DE DIQUES

Em um cenário hidrológico, ocorre uma cheia no rio e em seus afluentes com magnitude suficiente para superar os diques de proteção. A passagem de água sobre a crista dos diques provoca erosão em seu corpo e a abertura de uma brecha pela qual a água escoar, causando a inundação das áreas vizinhas, com consequências econômicas e sociais significativas.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais altos e tempos de concentração menores.
- Existência de programas de manejo da bacia hidrográfica.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de drenagem entre diferentes municípios e entidades.
- Existência de proteção contra erosão no dique.
- Projeto hidráulico adequado do dique.
- Projeto estrutural adequado do dique.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.
- Ações de manutenção e vigilância dos diques de proteção.

EROSÃO NA BASE DO DIQUE

Devido à passagem do fluxo pelo rio e à falta de proteção e manutenção nos diques de proteção, ocorre uma erosão localizada na base desse dique que pode se intensificar ao longo do tempo. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia no rio que exerce pressão sobre os diques que, estando estruturalmente fragilizados pela erosão em sua base, acabam falhando por deslizamento, provocando uma inundação das áreas adjacentes com elevadas consequências econômicas e sociais.

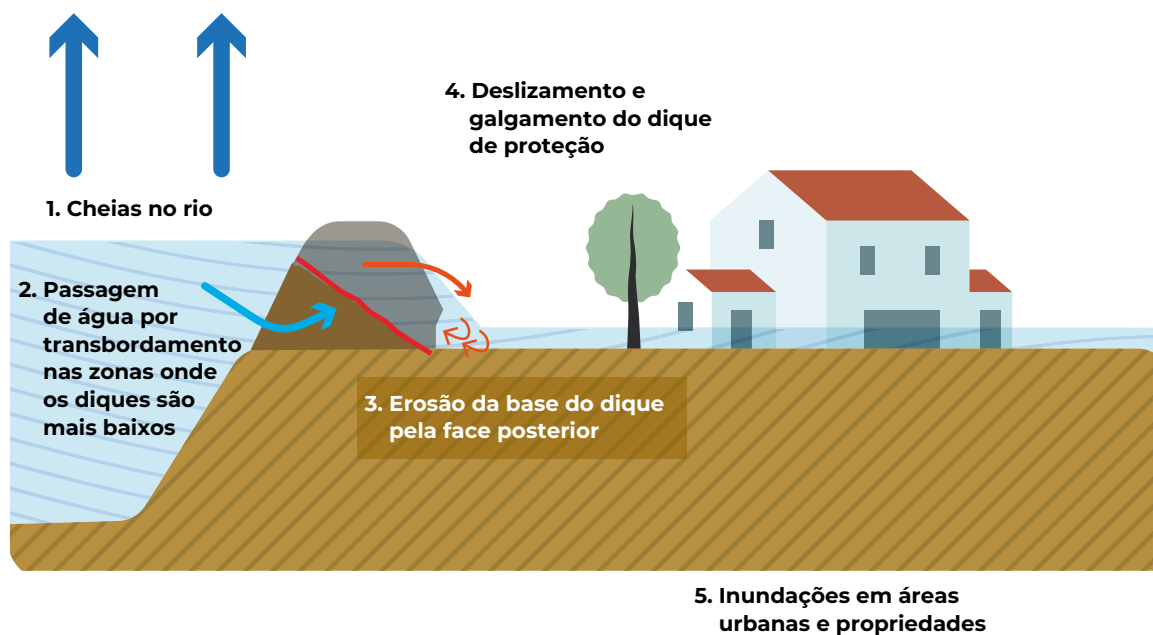


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitações, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Atividades de manutenção e vigilância dos diques de proteção.
- Existência de desmatamento na bacia que possa gerar erosão, arraste de sedimentos e o mau funcionamento dos diques.
- Projeto hidráulico e estrutural adequado do dique.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão da base.
- Presença de instrumentação e vigilância nas bacias para detectar problemas.
- Existência de vegetação que ajude a estabilizar os taludes dos diques.
- Atividades de manutenção e vigilância dos diques.

EROSÃO DO DIQUE PELO SEU TALUDE DE JUSANTE

Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia no rio que provoca o transbordamento dos diques de proteção em suas zonas mais baixas. Isso provoca a inundação da parte posterior dos trechos mais elevados do dique e a erosão do corpo do dique nessa área, a qual não está preparada para resistir a inundações. Por fim, essa erosão causa a falha dos diques principais por deslizamento, resultando em inundações das áreas adjacentes, com elevadas consequências econômicas e sociais.

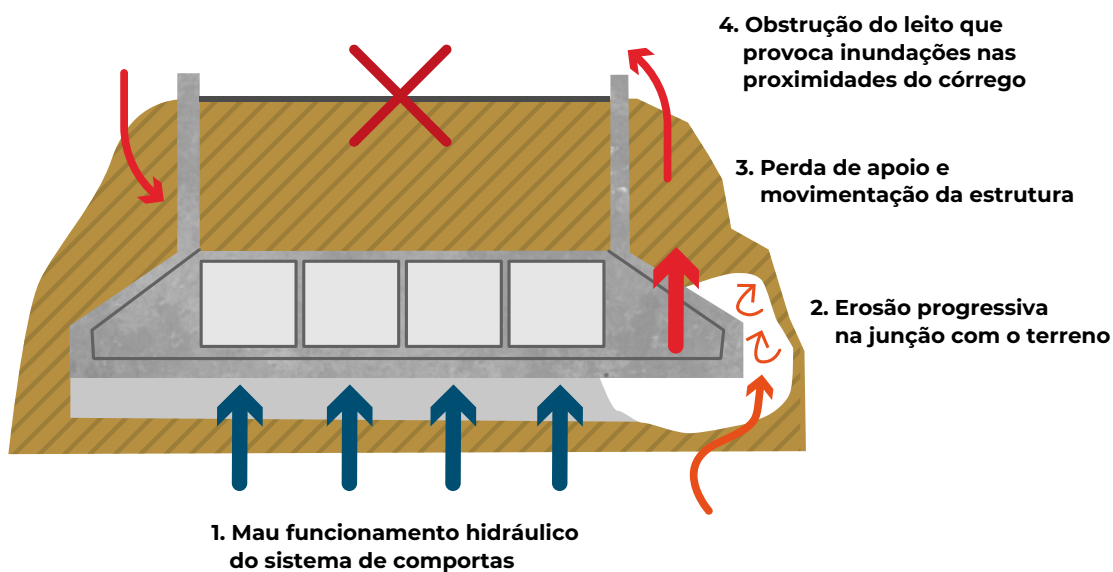


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Trabalhos de manutenção e monitoramento dos diques de proteção.
- Existência de desmatamento na bacia hidrográfica que possa gerar erosão, arraste de sedimentos e o mau funcionamento dos diques.
- Projeto estrutural adequado do dique.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.

EROSÃO DE OMBREIRA DE OBRA DE PASSAGEM

Devido ao mau funcionamento hidráulico da estrutura de concreto-comportas e à falta de manutenção, ocorre uma erosão localizada na junção da estrutura de concreto com o terreno, que pode se agravar ao longo do tempo. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia em um dos córregos que aprofunda a erosão na transição, fazendo com que a estrutura acabe separada do terreno e levando à perda da funcionalidade dessas obras, à erosão das margens e à obstrução do leito do córrego, agravando seu desempenho hidráulico.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detecção de problemas.
- Atividades de manutenção e vigilância do leito e das comportas.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito.

ROTEÇÃO RÍGIDA DE UMA MARGEM AUMENTA A EROSÃO NA OUTRA

A construção de obras rígidas de proteção em uma das margens do rio obriga a água a escoar pelo próprio leito do rio, dificultando o transbordamento. O fato de canalizar a água do rio provoca um aumento das velocidades e do poder erosivo da água, ao impedir que a água ultrapasse o leito e se espalhe pelas áreas adjacentes. Como consequência, ocorre uma desestabilização na margem oposta com fenômenos erosivos e uma maior inundação, com impactos ambientais, econômicos e sociais.

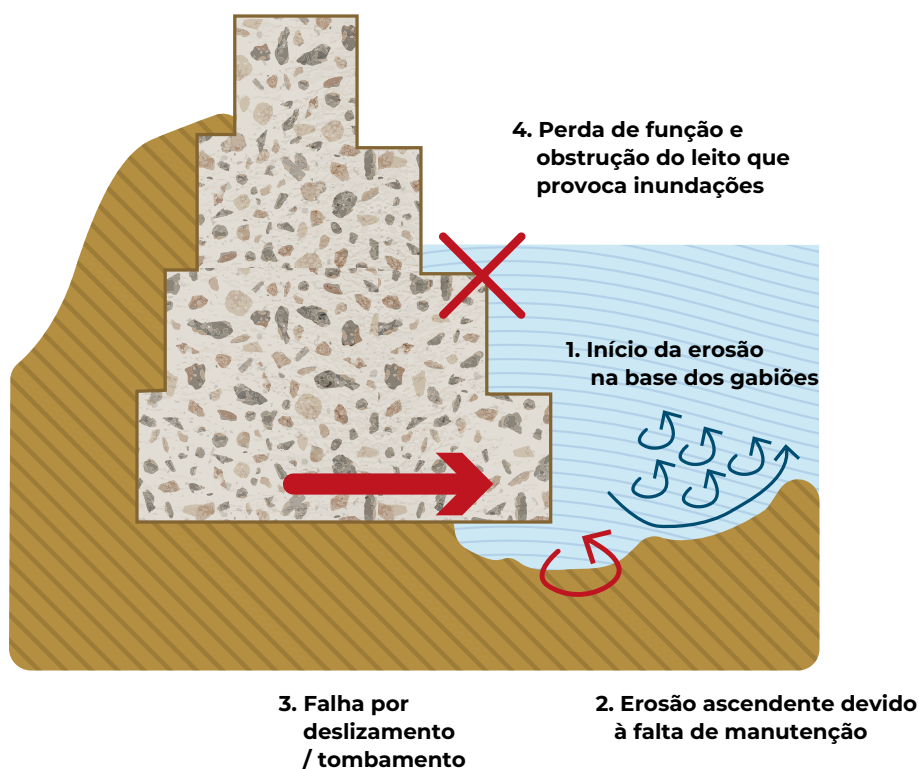


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Disponibilidade de estudos sobre caracterização dos solos e dos potenciais processos de erosão e sedimentação das bacias.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Existência de vegetação.
- Existência de programas de manejo de bacias hidrográficas.
- Atividades de manutenção e monitoramento do leito do rio e suas margens.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito do rio.

EROSÃO NA BASE DOS GABIÕES

Devido ao escoamento do rio e à falta de proteção e manutenção na base das proteções com gabiões, ocorre uma erosão localizada nessa base, que se pode agravar ao longo do tempo. Em cenário hidrológico, uma cheia no rio aumenta a erosão ascendente na base das proteções, fazendo com que fiquem descalçadas e falhem por uma combinação de deslizamento e tombamento. Essa falha provoca a perda desses gabiões, a erosão das margens e a obstrução do leito do rio, piorando seu desempenho hidráulico



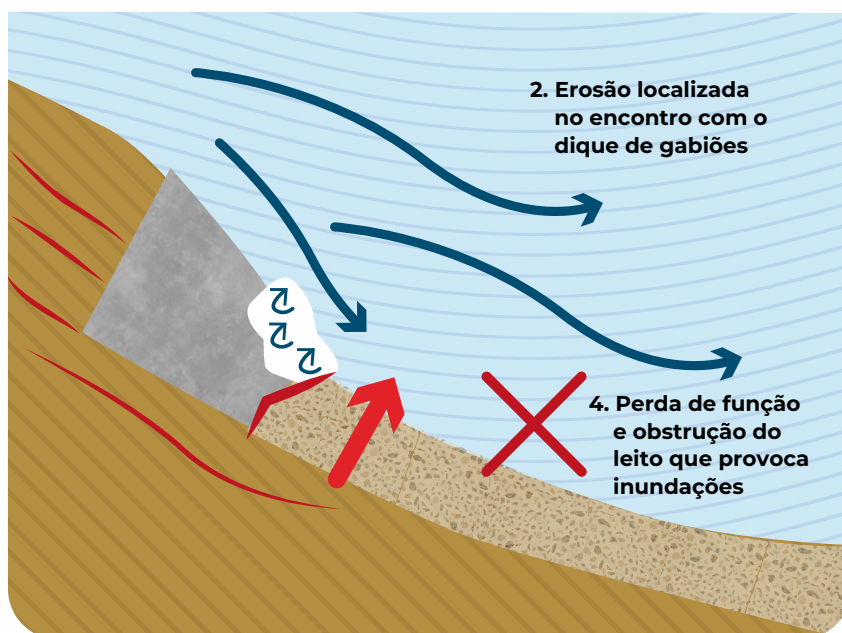
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Ações de manutenção e monitoramento das proteções com gabiões.
- Existência de proteção sob os gabiões que evite a erosão da base.
- Presença de tráfego rodoviário sobre a crista dos diques e proteções.
- Dimensionamento estrutural adequado dos diques.

EROSÃO NA TRANSIÇÃO DOS GABIÕES

Devido ao escoamento do rio e à falta de manutenção e/ou má execução na zona de transição entre a proteção com gabiões e o terreno natural, ocorre uma erosão localizada nessa transição, que pode aumentar ao longo do tempo. Em um cenário hidrológico, uma cheia no rio aprofunda a erosão na transição das proteções, levando à separação e ao colapso por uma combinação de deslizamento e tombamento devido ao empuxo do terreno. Essa falha resulta na perda da função dos gabiões, erosão das margens e obstrução do leito do rio, piorando seu desempenho hidráulico.

1. Falta de proteção na zona de transição



3. Falha na união entre o dique e a zona de transição

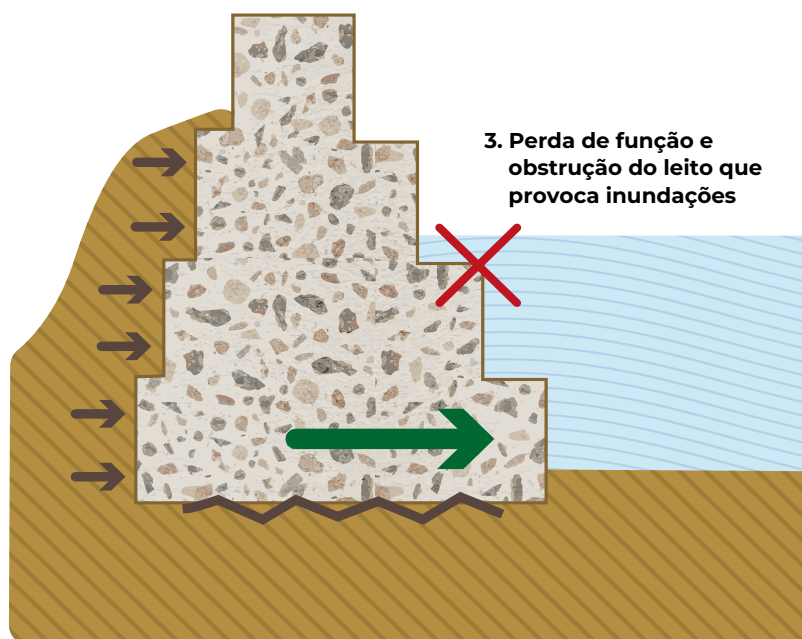
5. Falha por deslizamento/tombamento

Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Atividades de manutenção e vigilância das proteções com gabiões.
- Presença de tráfego rodoviário sobre a crista dos diques e projeções.
- Projeto estrutural adequado dos diques.

DESLIZAMENTO/TOMBAMENTO DE GABIÕES

Devido ao aumento do empuxo do terreno sobre as proteções de gabião, ocorre um movimento relativo dessas proteções em relação ao solo e uma perda de coesão com a fundação. Esse movimento continua a aumentar até causar a falha dos gabiões por uma combinação de deslizamento e tombamento. Essa falha resulta na perda da função desses gabiões, erosão das margens e obstrução do leito do rio, prejudicando seu funcionamento hidráulico.



1. Aumento do empuxo e perda de coesão na fundação

2. Falha por deslizamento / tombamento

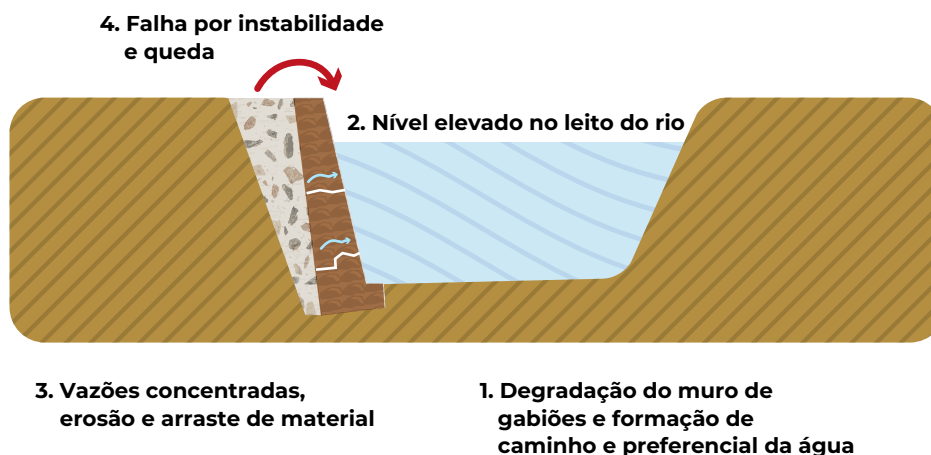
3. Perda de função e obstrução do leito que provoca inundações

Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Atividades de manutenção e vigilância das obras de proteção.
- Projeto estrutural adequado do dique.
- Presença de tráfego de veículos sobre a crista dos diques e estruturas associadas.

DANO EM MURO DE GABIÕES E QUEDA

Quando existem infiltrações de água através do corpo do muro de gabiões, ao longo do tempo, essas infiltrações acabam gerando caminhos preferenciais de fluxo. Num cenário hidrológico, ocorrem níveis elevados no rio que provocam vazões concentradas por esses caminhos, arrastando material do tardo do muro para o rio. Por fim, esses processos resultam no colapso do muro por instabilidade e consequente queda.

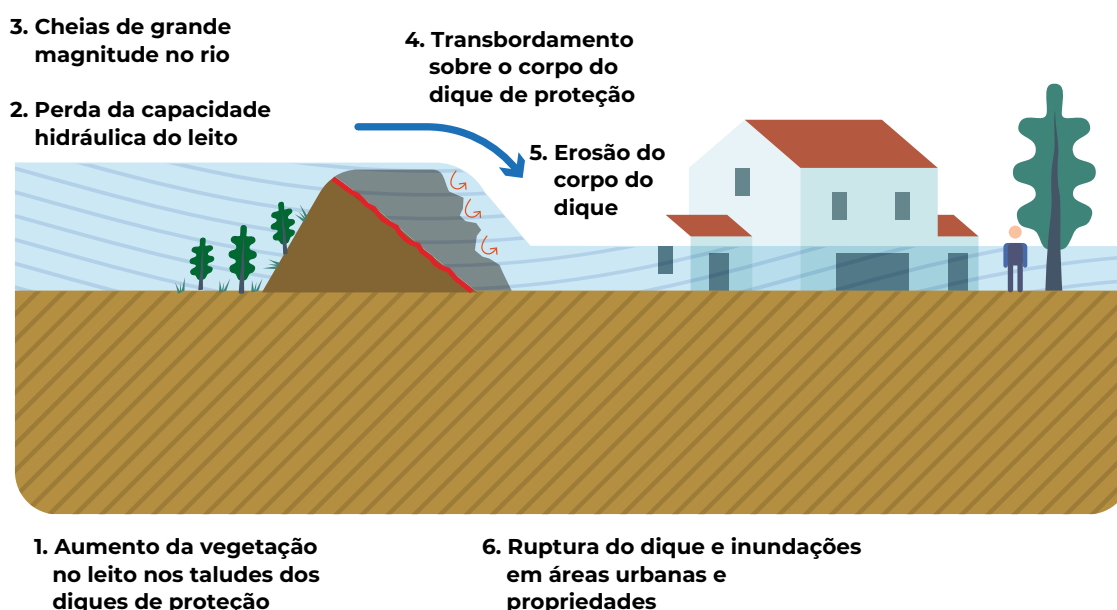


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Existência de desmatamento na bacia, o que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Atividades de manutenção e vigilância das obras de proteção.
- Trabalhos de manutenção e vigilância das obras de proteção.
- Projeto estrutural adequado do dique.
- Presença de tráfego de veículos sobre a crista dos diques e proteções.

AUMENTO DE VEGETAÇÃO E PERDA DE CAPACIDADE DO LEITO/CANAL DE DRENAGEM

Nas margens do rio existem diques de proteção contra inundações com taludes suficientemente suaves para permitir o desenvolvimento de vegetação. Essa vegetação, sem a devida manutenção, pode continuar a crescer e reduzir significativamente a capacidade hidráulica do leito do rio. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia no rio de magnitude suficiente que acaba superando os diques devido à menor capacidade hidráulica do canal. A passagem de água sobre a crista dos diques provoca erosão em seu corpo e a abertura de uma brecha, causando a inundação das zonas vizinhas com consequências econômicas e sociais elevadas.

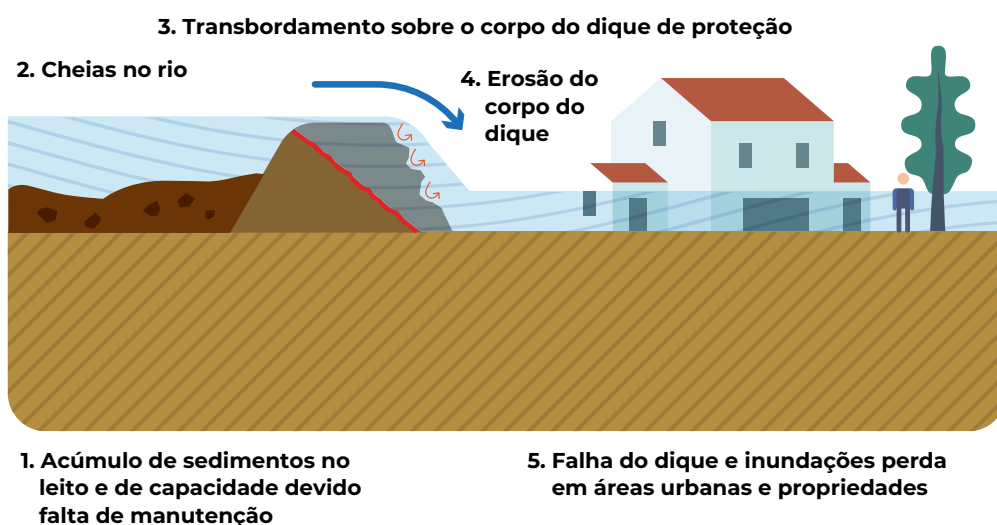


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitações, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, maiores picos de enchente e menores tempos de concentração.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão do pé.
- Projeto estrutural adequado do dique.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.
- Atividades de manutenção e vigilância do leito e de suas margens.
- Existência de espécies vegetais protegidas no leito, o que pode dificultar os trabalhos de manutenção e limpeza do canal.

ACÚMULO DE SEDIMENTOS NO LEITO

Em determinados trechos do rio, ocorrem velocidades reduzidas da água, o que provoca o acúmulo progressivo de grandes quantidades de sedimentos no leito ao longo do tempo, reduzindo significativamente sua capacidade hidráulica. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente para superar os diques devido à menor capacidade do leito. A água transborda pela crista dos diques, causando erosão em seu corpo e a abertura de uma brecha, o que resulta na inundação das áreas adjacentes, com elevadas consequências econômicas e sociais.

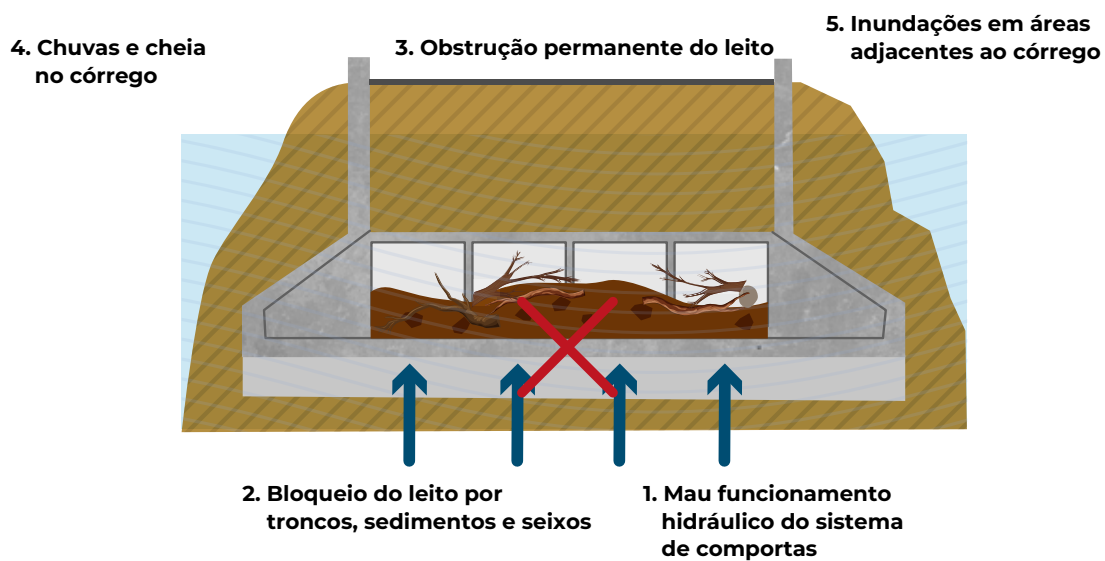


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação das bacias altas em áreas urbanas.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, carreamento de sedimentos e picos de cheia mais elevados.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Atividades de manutenção e vigilância do leito e das margens do rio.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão da base.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.
- Existência de sedimentação contínua e progressiva no leito.
- Existência de vegetação.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito.
- Presença de reduções de seção nos canais dos afluentes e no leito devido ao desenvolvimento urbano, chegando inclusive ao desaparecimento do curso d'água.

BLOQUEIO DE COMPORTAS EM CÓRREGOS

O sistema de comportas e a estrutura de concreto para proteção dos córregos representam um estreitamento do leito, o que pode levar a um mau funcionamento hidráulico na saída do fluxo. Com o tempo, isso pode causar o acúmulo de sedimentos, seixos e troncos na entrada da estrutura de concreto, bloqueando a passagem da água. Em cenário hidrológico, ocorre uma cheia de magnitude suficiente em um dos córregos bloqueados e, como a água não consegue escoar, forma-se um represamento a montante, resultando em inundações de moradias e propriedades localizadas junto ao córrego.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação das bacias hidrográficas nas áreas urbanas.
- Existência de desmatamento na bacia, que pode gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração menores.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Atividades de manutenção e vigilância do leito do rio e das comportas.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito do rio.

IMPOSSIBILIDADE DE FECHAMENTO DAS COMPORTAS

Os sistemas de comportas e estruturas de concreto são projetados para serem fechados quando ocorrem níveis elevados no rio, a fim de evitar a entrada de água e proteger as áreas próximas aos córregos. Em um cenário hidrológico, com uma cheia no rio e devido ao mau funcionamento dessas comportas por problemas de manutenção ou pela presença de materiais carreados, as comportas não conseguem ser fechadas, e a água do rio entra no córrego, causando importantes danos ambientais e sociais devido a inundações com água de má qualidade nessa região.

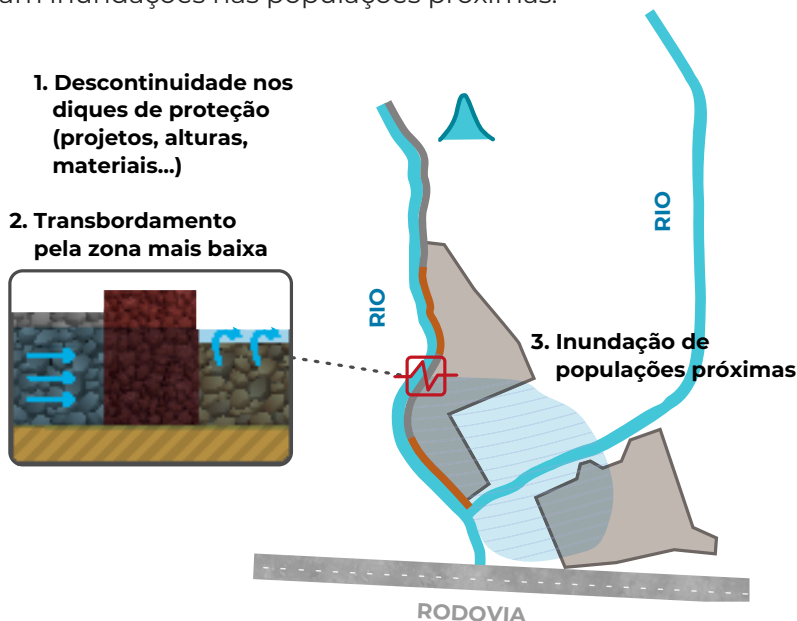


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Disponibilidade de estudos sobre caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação nas bacias altas das zonas urbanas.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, maiores picos de cheia e menores tempos de concentração.
- Presença de instrumentação e vigilância nas bacias para detectar problemas.
- Ações de manutenção e vigilância do leito e das comportas.
- Disponibilidade de estudos hidráulicos sobre o funcionamento do leito.

INUNDAÇÃO POR DESCONTINUIDADES NOS DIQUES

A construção dos diques de proteção em diferentes fases, com diferentes projetos, com materiais distintos, por construtoras diferentes e/ou por comunidades distintas gera zonas de descontinuidade no sistema de diques de proteção. Essa falta de continuidade resulta em pontos fracos, permitindo a entrada de água pela zona mais baixa. A dificuldade de escoamento da água na planície da região e a presença dos próprios diques provocam inundações nas populações próximas.

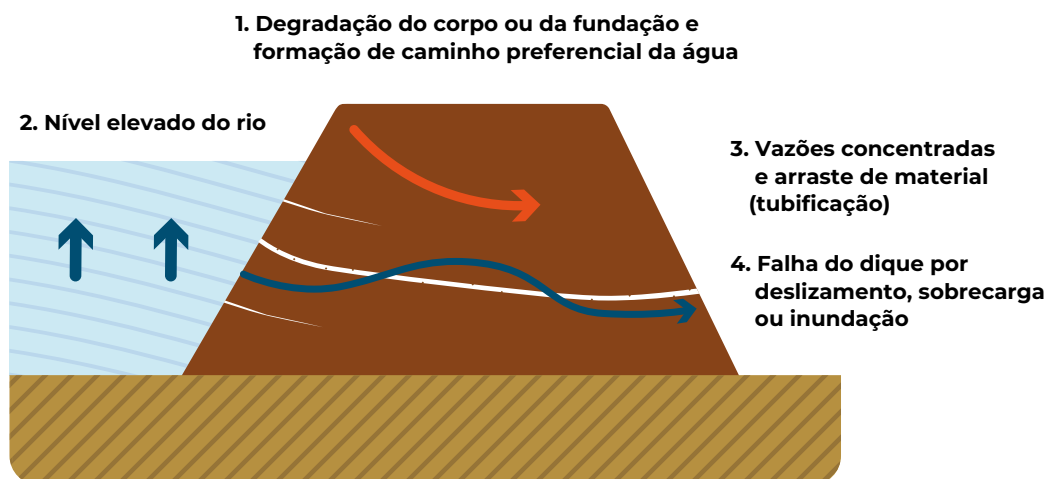


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Existência de programas de manejo de bacias hidrográficas.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de proteção contra inundações entre diferentes municípios e entidades.
- Atividades de manutenção e vigilância dos diques de proteção.

TUBIFICAÇÃO, RUPTURA DE DIQUES E INUNDAÇÃO

Inicia-se um processo de degradação do corpo ou da fundação do dique. Com o passar do tempo, a água infiltra-se pelo material do dique, gerando caminhos preferenciais de fluxo. Em cenário hidrológico, ocorrem níveis elevados no rio que geram vazões concentradas por esses caminhos, provocando erosão e arraste de material. Por fim, esses processos levam ao colapso do dique por deslizamento e a uma consequente inundação nas áreas circundantes.



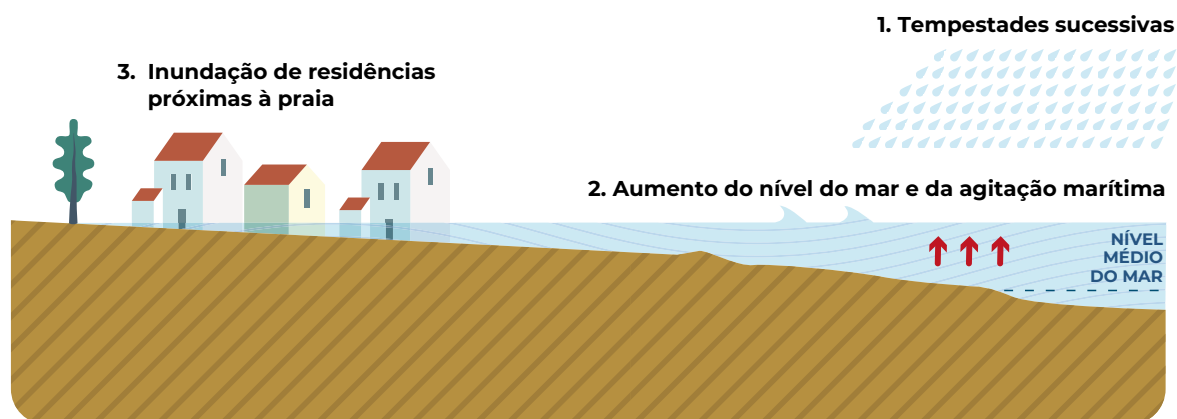
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Existência de vegetação que possa facilitar a tubificação.
- Atividades de manutenção e vigilância dos diques de proteção.
- Dimensionamento hidráulico adequado do dique.
- Dimensionamento estrutural adequado do dique.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.

3.3. Modos de Falha por inundação costeira

INUNDAÇÃO COSTEIRA

Devido a tempestades sucessivas, ocorrem temporais no mar, o que acarreta um aumento do nível do mar e da agitação marítima. Por fim, essa elevação alcança as residências localizadas junto à praia, provocando sua inundação.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na elevação do nível do mar e na agitação marítima.
- Disponibilidade de estudos sobre caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação das praias.
- Disponibilidade de planos de manutenção e regeneração das praias.

FALHA POR EROSÃO DAS PRAIAS E SEUS SISTEMAS DUNARES

Devido a sucessivas tempestades, ocorre a erosão contínua das praias. Pela falta de manutenção entre as tempestades, essa erosão atinge os sistemas dunares que constituem uma proteção natural contra inundações. A erosão provoca a redução da cota de coroamento das dunas e facilita o transbordamento da inundação costeira. Nesse cenário, ocorre a inundação das residências localizadas junto à praia.

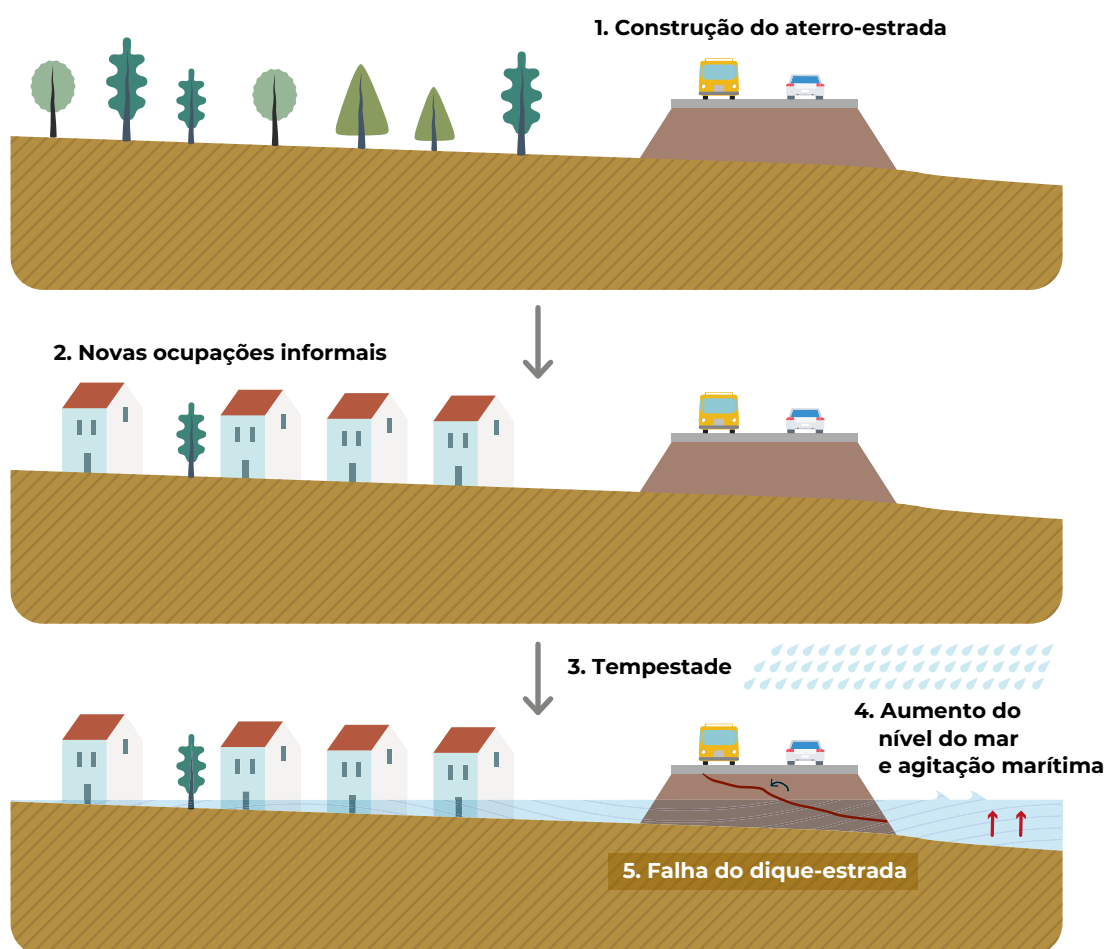


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na elevação do nível do mar e na agitação marítima.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação das praias.
- Disponibilidade de planos de manutenção e regeneração das praias.

AUMENTO DE OCUPAÇÕES INFORMAIS EM ZONAS PROTEGIDAS

A construção de um aterro-estrada de proteção planejado aumenta a proteção contra inundações costeiras no município. Por esse motivo, devido à sensação de segurança percebida pela população, ocorre um aumento no desenvolvimento de ocupações informais nessa área. Durante uma tempestade, o dique-estrada é danificado, permitindo a passagem da água, provocando inundações nas zonas urbanas construídas ao seu redor. Essas inundações geram um número maior de consequências em comparação com a situação anterior à construção do aterro-estrada, devido ao aumento do número de moradias e pessoas afetadas.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitações, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na elevação do nível do mar e na agitação marítima.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão da base.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.

FALHA DO DIQUE-ESTRADA DEVIDO À AÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA

Uma tempestade eleva o nível do mar, fazendo com que as ondas atinjam a seção do dique-estrada. Além disso, a proteção do talude da estrutura está deteriorada pela falta de manutenção, permitindo que as ondas provoquem erosão com facilidade. A erosão avança rapidamente pelo núcleo da seção, abrindo uma brecha na estrutura; a água penetra por essa abertura e inunda as áreas urbanas adjacentes.

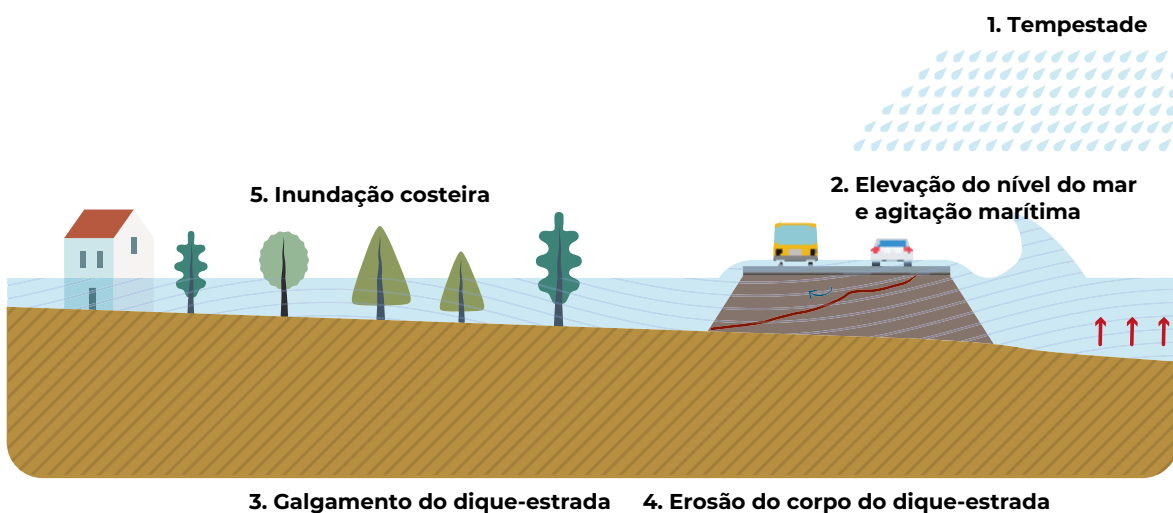


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na elevação do nível do mar e na agitação marítima.
- Disponibilidade de estudos sobre a caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão da base.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.

FALHA DO DIQUE ESTRADA POR GALGAMENTO

Devido a uma tempestade, o nível do mar se eleva com magnitude suficiente para que a agitação marítima acabe ultrapassando a seção do dique-estrada. A passagem de água sobre a crista do dique provoca a erosão de seu corpo e a abertura de uma brecha por onde a água passa, causando uma inundação das zonas vizinhas com elevadas consequências econômicas e sociais.



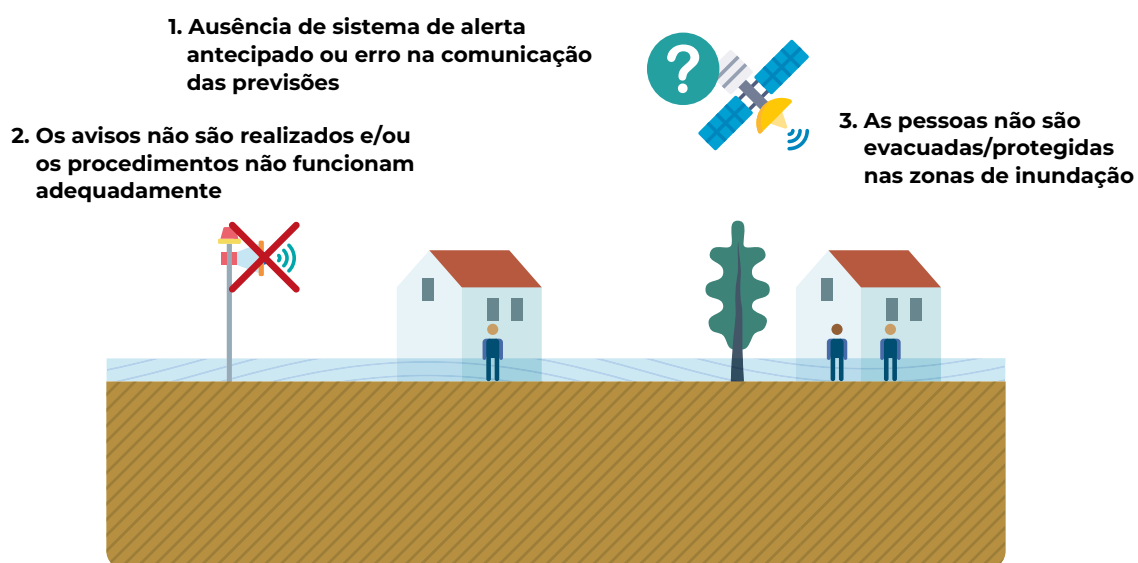
Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na elevação do nível do mar e na agitação marítima.
- Disponibilidade de estudos sobre caracterização dos solos e os potenciais processos de erosão e sedimentação.
- Existência de proteção a jusante do dique que evite a erosão do pé.
- Disponibilidade de estudos e ensaios geotécnicos do material que compõe o dique.

3.4 Modos de Falha por sistema de gestão de risco

INEFICÁCIA DO SISTEMA DE ALERTAS

Em cenário hidrológico, prevê-se uma precipitação de magnitude suficiente para causar uma cheia no rio e a inundação de algumas das áreas urbanas ao seu redor. Devido a um erro na coleta de dados ou na comunicação dos alertas e/ou à ineficácia dos procedimentos de proteção e evacuação da população, os avisos não são realizados de forma adequada e a população não abandona as propriedades antes da inundação, aumentando suas consequências sociais.

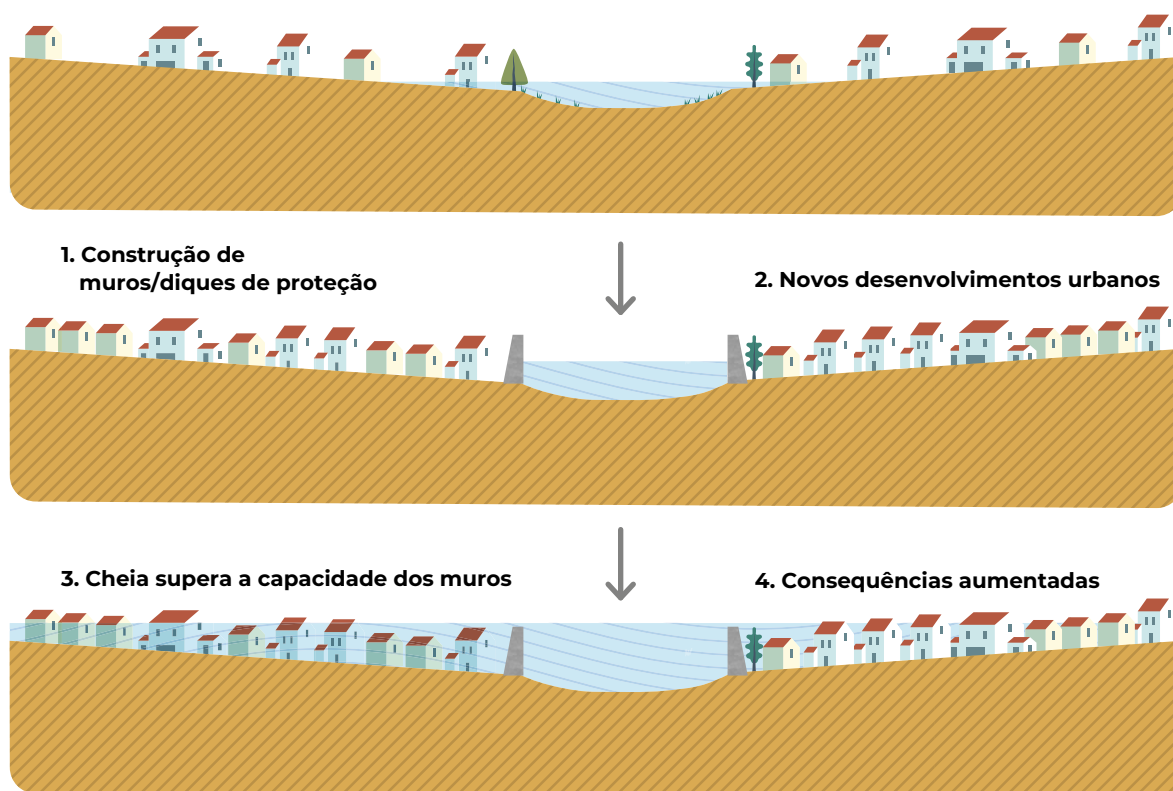


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Gestão e conservação das informações dos projetos ao longo dos anos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.

AUMENTO DE DESENVOLVIMENTOS URBANOS

A construção de diques de proteção resulta em um aumento da segurança frente a inundações nas áreas adjacentes ao leito do rio. Por esse motivo, devido à sensação de segurança percebida pela população, ocorre um aumento do desenvolvimento urbano na região. Em cenário hidrológico, as vazões no leito do rio superam a capacidade de projeto dos diques, o que provoca inundações nas áreas urbanas construídas ao redor. Essas inundações geram um número maior de consequências em comparação com a situação anterior à construção dos diques, devido ao aumento do número de habitações e pessoas afetadas.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.

CONFLITOS SOCIAIS

Durante a construção das obras e devido à socialização inadequada do projeto e/ou à ocupação dos terrenos vizinhos, surgem conflitos sociais que se intensificam, resultando em bloqueios e furtos durante a execução das obras. Esses conflitos impedem o andamento normal dos trabalhos, ocasionando aumento dos custos.

2. Bloqueios e furtos durante a construção das obras

1. Conflitos sociais por má socialização das obras

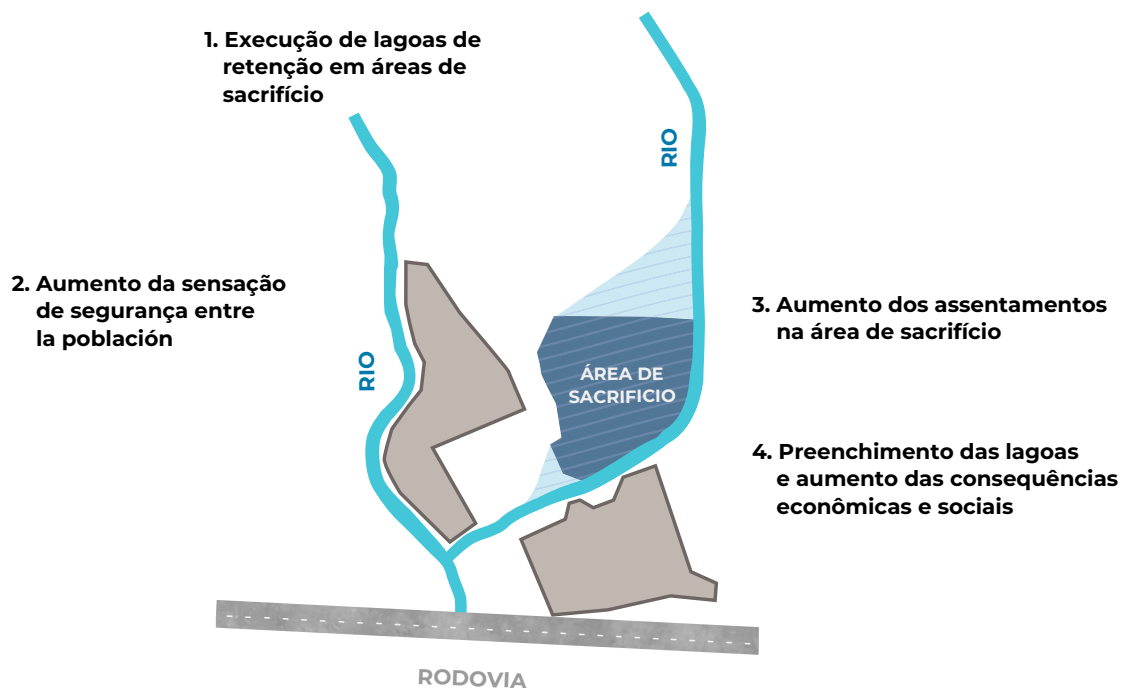


Fatores que influenciam o risco

- Acompanhamento social nas fases de pré-investimento, projeto e construção, de forma que os beneficiários conheçam o projeto.
- Gestão e preservação das informações dos projetos ao longo dos anos.

OCUPAÇÕES URBANAS NAS ÁREAS DE SACRIFÍCIO

A execução de áreas inundáveis pode possibilitar o aumento da população nas áreas vizinhas devido a uma falsa sensação de segurança, já que essas zonas não são mais inundadas com tanta frequência. O desenvolvimento de ocupações urbanas pode acabar se estendendo para dentro das próprias áreas de sacrifício. Em um cenário hidrológico, uma cheia preencheria essas áreas, gerando consequências sociais e econômicas superiores às existentes antes da construção.

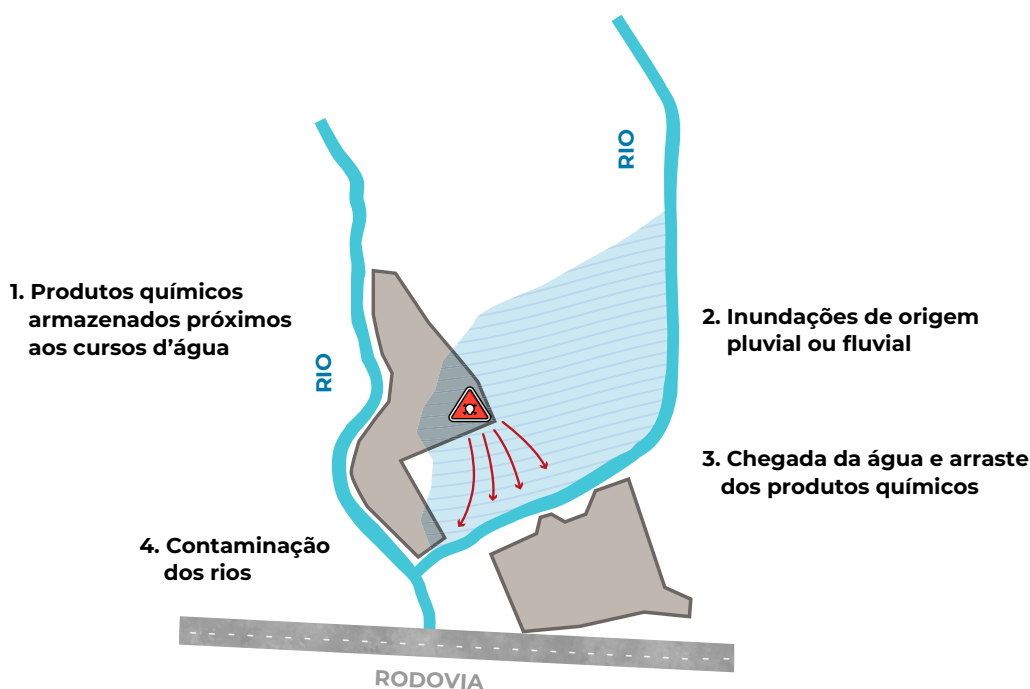


Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.

DANOS AMBIENTAIS POR DERRAMAMENTOS

Em áreas próximas ao leito dos rios, há depósitos com produtos químicos utilizados no tratamento da água. Também podem existir fossas sépticas ou indústrias que geram resíduos. Em um cenário hidrológico, um episódio de inundação — seja de origem pluvial ou fluvial — provoca o arraste desses produtos até os rios próximos. Isso resulta na contaminação dos rios, gerando consequências ambientais.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.
- Existência de programas de gestão de bacias hidrográficas.
- Existência de conscientização social em relação a essa problemática.
- Existência e dimensionamento adequado de obras de drenagem para desviar inundações e reduzir sedimentos.
- Disponibilidade de planos e programas para coordenar as ações de drenagem entre diferentes municípios e entidades.

GESTÃO INCORRETA DE RESERVATÓRIOS E DESCARGAS A JUSANTE

É realizado um prognóstico de chuvas de alta intensidade na bacia do rio. A gestão dos reservatórios a montante do curso d'água não é eficiente e decide-se não operar as comportas diante da previsão de conseguir reter todo o volume de água gerado. Posteriormente, reconhece-se a incapacidade do reservatório para reter todo o volume gerado pela tempestade e realizam-se descargas reativas com volumes e vazões superiores às que teriam sido feitas caso as comportas tivessem sido operadas preventivamente. Essas descargas provocam inundações a jusante do reservatório, afetando as comunidades.



Fatores que influenciam o risco

- Disponibilidade de dados de precipitação, existência de redes de estações meteorológicas e variabilidade geográfica da precipitação.
- Influência das mudanças climáticas na intensidade das precipitações e no nível das cheias para um determinado período de retorno.
- Existência de desmatamento na bacia, que possa gerar erosão, arraste de sedimentos, picos de cheia mais elevados e tempos de concentração mais curtos.
- Presença de instrumentação e monitoramento nas bacias para detectar problemas.

4. Relação de estudos técnico-científicos

Nesta seção são mencionados uma série de estudos técnico-científicos, conforme a tipologia dos Modos de Falha, que devem ser considerados para reduzir o risco de ocorrência dos Modos de Falha e diminuir a incerteza, a fim de melhorar o projeto das infraestruturas.

MODO DE FALHA POR INUNDAÇÃO PLUVIAL E FLUVIAL

- Existência de dados meteorológicos.
- Existência de informações sobre inundações históricas.
- Dados de eventos extremos relacionados às mudanças climáticas.
- Estudo hidrológico da bacia de influência.
- Estudo estrutural da obra de proteção.
- Estudo geológico e geotécnico da área e das características da fundação.
- Atividades na bacia que possam influenciar a obra de proteção.
- Plano de gestão da bacia.
- Plano de Ação de Emergência.
- Inventário e localização das infraestruturas de proteção existentes.

MODO DE FALHA POR INUNDAÇÃO COSTEIRA

- Existência de dados meteorológicos.
- Dados de eventos extremos relacionados às mudanças climáticas.
- Estudo estrutural da obra de proteção.
- Estudo geológico e geotécnico da fundação.
- Plano de Ação de Emergência.

MODO DE FALHA POR SISTEMA DE GESTÃO DE RISCO

- Planos de ordenamento urbano dos municípios afetados pela construção das obras de proteção contra inundações.
- Planos de operação e manutenção da obra de proteção.
- Protocolos de alerta à população em caso de inundação.
- Planos de Ação de Emergência.
- Localização das populações expostas e das principais infraestruturas críticas.
- Estudos de impacto ambiental.

5. Recomendações e boas práticas

A seguir, são reunidas uma série de recomendações e boas práticas de intervenção, conforme a tipologia de Modos de Falha.

Modo de Falha por INUNDAÇÃO PLUVIAL

Para reduzir o risco dos Modos de Falha do tipo inundação pluvial, devem ser consideradas as seguintes ações:

- Realizar uma modelação hidráulica de toda a rede de drenagem para compreender seu funcionamento hidráulico e avaliar sua vulnerabilidade frente a diferentes situações. Para isso, devem ser analisadas as inundações causadas por tempestades com diferentes períodos de recorrência. Essa modelagem permitirá identificar os pontos vulneráveis ou deficientes da rede e aplicar melhorias no sistema.
- Determinar os hidrogramas das prováveis cheias afluentes ao canal, juntamente com a caracterização estatística de suas probabilidades de ocorrência. Também devem ser analisadas e consideradas as cheias históricas. Levar-se-á em conta o conhecimento disponível sobre possíveis mudanças de longo prazo nas condições hidrológicas da bacia e os possíveis impactos das mudanças climáticas. Deve-se justificar o grau de confiabilidade das metodologias utilizadas no projeto para a determinação das diferentes cheias e sua adequação às características da bacia.
- Caso haja escassez de dados de precipitação no país, devido à baixa densidade da rede de estações meteorológicas e à alta variabilidade geográfica da precipitação, devem ser realizados os ajustes pertinentes nas séries históricas.
- Se a rede de medição de vazões for muito pouco densa, pode-se estudar a possibilidade de instalar estações adicionais de medição para o projeto.
- Considerar a incerteza nos dados de precipitação existentes devido a problemas no registro e na manutenção da rede.
- Realizar visitas técnicas ao local onde está situada a obra de proteção para identificar possíveis aspectos que não tenham sido considerados no projeto ou averiguar as causas de eventual mau funcionamento da infraestrutura.
- Elaborar um Manual de operação e manutenção da infraestrutura, com o objetivo de dispor dos procedimentos e da equipe necessária para sua operação e manutenção. Recomenda-se que o manual inclua: as tarefas a serem realizadas (inspeções, medições, manutenção de instrumentação, revisões de segurança etc.), os responsáveis por cada tarefa, a periodicidade e o departamento/administração local responsável.
- Elaborar um Plano de manejo integrado da bacia, de forma que a gestão e operação da obra de proteção considerem todos os fatores envolvidos na bacia. Para isso, recomenda-se que o plano incorpore um estudo detalhado dos sedimentos que chegam ao curso d'água a partir de qualquer ponto da bacia. Além disso, a gestão integrada da bacia deve ser acompanhada de outras ações que reduzam a entrada de sedimentos no curso, como o reflorestamento, a proteção da bacia e a construção de estruturas de retenção de sedimentos.

- Devem ser analisadas as características topográficas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do terreno onde serão construídas as obras de proteção contra inundações. O escopo das investigações e estudos a serem realizados deve permitir a caracterização dos terrenos afetados pelas obras de proteção e a obtenção dos parâmetros de cálculo necessários para determinar a resistência, deformabilidade, permeabilidade e estabilidade físico-química do terreno.
- Os parâmetros de resistência a serem utilizados nos cálculos deverão ser justificados com um número suficiente de ensaios, além de outros métodos indiretos que contribuam para uma estimativa mais robusta.
- O projeto deverá definir os materiais a serem utilizados, determinar sua procedência, localização geográfica e volumes disponíveis, estabelecer as características que devem cumprir e detalhar os procedimentos para sua verificação e controle. Os materiais deverão ser ensaiados, e as unidades da obra serão executadas conforme as especificações do projeto.
- Em diques do tipo solo compactado (ou materiais soltos), deverá ser cuidadosamente projetado o sistema de filtros e drenos para evitar a ocorrência de fenômenos de erosão interna. Também deverão ser especialmente estudados os contatos com tubulações que possam atravessá-los e com fundações que possam ser suscetíveis à erosão.
- Deverão ser consideradas as ações sísmicas sobre a obra de proteção, de acordo com a atividade sísmica da região onde está localizada.
- A obra de proteção e suas margens deverão dispor de equipamentos de instrumentação adequados para permitir a análise periódica de seu comportamento e a detecção de anomalias que possam afetar sua segurança.
- Proteger os equipamentos de monitoramento com ferramentas de detecção e prevenção contra vandalismo.

Modo de Falha POR INUNDAÇÃO FLUVIAL

Para reduzir o risco dos Modos de Falha do tipo inundação fluvial, deve-se considerar:

- Devem ser determinados os hidrogramas das previsíveis cheias afluentes ao leito, juntamente com a caracterização estatística de suas probabilidades de ocorrência. Também serão analisadas e consideradas as cheias históricas. Será levado em conta o conhecimento disponível sobre possíveis mudanças a longo prazo nas condições hidrológicas da bacia e os possíveis impactos das mudanças climáticas. A confiabilidade das metodologias utilizadas no projeto para determinar as diferentes cheias e sua adequação às características da bacia deverá ser justificada.
- Os elementos de controle dos canais de drenagem devem ser projetados de forma a garantir seu funcionamento em qualquer situação e, em particular, em situações de cheia. Devem dispor de dispositivos de acionamento redundantes, ser alimentados por fontes de energia independentes e ter acessos garantidos e controlados.
- Caso haja falta de dados de precipitação no país devido à escassez da rede de estações meteorológicas e à alta variabilidade geográfica da precipitação, deverão ser realizadas as análises e ajustes pertinentes das séries históricas.
- Caso a rede de medição de vazões seja muito pouco densa, poderá ser estudada a possibilidade de instalar estações adicionais de medição para o projeto.
- Deve-se considerar a incerteza nos dados de precipitação existentes devido a problemas no registro e manutenção da rede de monitoramento.
- Realizar um projeto de estudo de traçado de possíveis obras de drenagem, abrangendo desde o desenho até sua construção final, incluindo características geométricas, capacidade de projeto e transporte do material a ser evacuado.
- Realizar visitas técnicas ao local onde está situada a obra de proteção, a fim de detectar possíveis aspectos que não tenham sido considerados durante o projeto ou investigar as causas do mau funcionamento da infraestrutura.
- Elaborar um Manual de operação e manutenção da infraestrutura, com o objetivo de dispor dos procedimentos e da equipe necessária para realizar a operação e manutenção. Recomenda-se que o manual inclua: tarefas a serem realizadas (inspeções, medições, manutenção da instrumentação, revisões de segurança, etc.), os responsáveis por cada tarefa, a periodicidade de execução e o departamento/ administração local responsável
- Elaborar um Plano de manejo integral da bacia, de forma que a gestão e operação da obra de proteção considere todos os fatores envolvidos na bacia. Recomenda-se que o plano incorpore um estudo detalhado dos sedimentos que chegam ao leito a partir de qualquer ponto da bacia. Além disso, a gestão integral da bacia deve ser acompanhada por outras ações que reduzam o aporte de sedimentos ao leito, como reflorestamento, proteção da bacia e construção de obras de retenção de sedimentos

- Devem ser analisadas as características topográficas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do terreno onde serão construídas as obras de proteção contra inundações. A abrangência das investigações e estudos a serem realizados deve permitir a caracterização dos terrenos afetados pelas obras de proteção, bem como a obtenção dos parâmetros de cálculo necessários para determinar a resistência, deformabilidade, permeabilidade e estabilidade físico-química do solo.
- Os parâmetros resistentes a serem utilizados nos cálculos deverão ser justificados com um número suficiente de ensaios, além de outros métodos indiretos que contribuam para uma estimativa mais robusta.
- O projeto deverá definir os materiais a serem utilizados, determinar sua procedência, localização geográfica e os volumes disponíveis, estabelecer as características que devem atender e especificar os procedimentos para sua verificação e controle. Os materiais deverão ser ensaiados e as unidades da obra deverão ser executadas conforme as especificações do projeto.
- Nos diques cuja tipologia seja de materiais soltos, deve-se atentar para o projeto de filtros e drenos a fim de evitar a ocorrência de fenômenos de erosão interna. Serão analisados com especial atenção os contatos com tubulações que possam atravessá-los, bem como as fundações que possam ser suscetíveis à erosão.
- Devem ser consideradas as ações sísmicas sobre a obra de proteção, de acordo com a atividade sísmica da região onde está localizada.
- A obra de proteção e suas margens devem dispor de equipamentos de instrumentação adequados para permitir a análise periódica de seu comportamento e a detecção de anomalias que possam comprometer sua segurança.
- Os equipamentos de monitoramento devem ser protegidos com ferramentas adequadas para a detecção e prevenção de vandalismo contra esses elementos.

Modo de Falha POR INUNDAÇÃO COSTEIRA

Para reduzir o risco dos Modos de Falha do tipo inundação costeira, devem ser consideradas as seguintes recomendações:

- Deve-se considerar o conhecimento disponível sobre as possíveis mudanças de longo prazo nas condições hidrológicas e os impactos potenciais das mudanças climáticas. O grau de confiabilidade das metodologias utilizadas no projeto deverá ser devidamente justificado.
- No caso de ausência de dados sobre precipitações e marés, devido à escassez da rede de estações meteorológicas e à alta variabilidade geográfica das chuvas, devem ser realizados os ajustes e análises pertinentes das séries históricas.
- Realizar estudos sobre marés, nível do mar e suas probabilidades, a fim de projetar e dimensionar adequadamente as obras de proteção contra inundações.
- Realizar visitas técnicas ao local onde se encontra a obra de proteção para identificar possíveis aspectos não considerados no projeto ou investigar as causas do mau funcionamento da infraestrutura.
- Elaborar um Manual de Operação e Manutenção da infraestrutura, com o objetivo de definir os procedimentos e o pessoal necessário para a execução das atividades de operação e manutenção. Recomenda-se que o manual inclua: tarefas a serem executadas (inspeções, medições, manutenção de instrumentação, revisões de segurança, etc.), os responsáveis por cada tarefa, a periodicidade de cada uma e o departamento/administração local ao qual estão vinculados
- Devem ser analisadas as características topográficas, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do terreno onde se pretende construir as obras de proteção contra inundações. A abrangência das investigações e estudos deve permitir a caracterização dos terrenos afetados pelas obras e a obtenção dos parâmetros de cálculo necessários para determinar a resistência, deformabilidade, permeabilidade e estabilidade físico-química do solo
- Os parâmetros de resistência utilizados nos cálculos devem ser justificados com um número suficiente de ensaios, além de outros métodos indiretos que contribuam para uma estimativa mais robusta.
- O projeto deverá definir os materiais a serem utilizados, determinar sua procedência, localização geográfica e volumes disponíveis, estabelecer as características exigidas e detalhar os procedimentos para sua verificação e controle. Os materiais deverão ser testados e as unidades da obra executadas conforme as especificações do projeto.
- Devem ser consideradas as ações sísmicas sobre a obra de proteção, de acordo com a atividade sísmica da região onde ela se localiza.
- A obra de proteção deve contar com equipamentos de instrumentação adequados para possibilitar a análise periódica de seu comportamento e a detecção de anomalias que possam comprometer sua segurança.
- Proteger os equipamentos de monitoramento com dispositivos que permitam a detecção e prevenção de atos de vandalismo.

Modo de Falha POR SISTEMAS DE GESTÃO DO RISCO

Para reduzir o risco dos Modos de Falha relacionados ao sistema de gestão do risco, devem ser consideradas as seguintes medidas:

- Nos casos que envolvam problemas sociais, deve-se considerar a opinião da população e realizar reuniões com o objetivo de alcançar acordos.
- Devem ser realizadas reuniões de conscientização da população sobre o risco de inundação.
- Devem ser promovidas capacitações sobre o risco de inundação.
- Devem ser elaborados planos de evacuação da população para o caso de falha das obras de proteção contra inundações, os quais devem ser coordenados com os serviços de emergência.
- No caso de impactos ao meio ambiente, devem ser implantadas as medidas necessárias para sua preservação.

Referências

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Resumen ejecutivo de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático del BID*. 2018.

Banco Interamericano de Desenvolvimento. *Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID*. 2019.

International Standardization Organization (ISO). *Risk Management – Principles and Guidelines*. ISO 31000. 2009.

International Electrotechnical Commission. *Analysis Techniques for System Reliability – Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. International Standard. 2006.

Mecca, S., y Masera, M. *Technical Risk Analysis in Construction by Means of FMEA Methodology*. 1999.

Kim, J. H., H. Y. Jeong, y J. S. Park. *Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for Railroad Systems*. 2009.

Aguilar Otero, J., Torres Arcique, R., y Magaña Jiménez, D. *Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. 2010.

Zeng, S. X., Tam, C. M., y Tam, V. W. Y. *Integrating Safety, Environmental and Quality Risks for Project Management using a FMEA Method*. 2010.

Carlson, C. S. *Effective FMEAs. Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. 2012.

SPANCOLD. *Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Guía Técnica N° 8 de Explotación de Presas y Embalses. Análisis de Riesgos aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses*. 2012.

Hwang, H., Lansey, K., y Quintanar, D. R. *Resilience-based Failure Mode Effects and Criticality Analysis for Regional Water Supply System*. 2015.

Rasoul, Y. y Hanewinkel, M. *Climate Change and Decision-Making Under Uncertainty*. 2016.

Marchau, Vincent A.W.J., Warren E. Walker, Pieter J.T.M. Bloemen, y Steven W. Popper. *Decision Making Under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. 2019.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Bolivia). *Medidas de protección y mitigación para reducir riesgos para eventos de inundación y crecidas en áreas agrícolas y urbanas en cuencas Alta y Baja*. 2021.

